

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем**

**Кафедра Телекомунікаційних систем**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Леонід УРИВСЬКИЙ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломна робота  
на здобуття ступеня бакалавра  
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка  
на тему: «Комплексна аналітична модель на хмарному сервері повідомлень із  
ознаками пріоритетів»**

Виконала:

студентка III курсу, групи ТС-п71

Мартінова Катерина Геннадіївна \_\_\_\_\_

Керівник:

Зав. кафедрою, професор, д.т.н.,

Уривський Леонід Олександрович \_\_\_\_\_

Рецензент:

К.т.н., доцент

Правило Валерій Володимирович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інститут телекомунікаційних систем**  
**Кафедра Телекомунікаційних систем**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Програма професійного спрямування (спеціалізація) – «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Леонід УРИВСЬКИЙ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломну роботу студенту

**Мартинівій Катерині Геннадіївній**

1. Тема роботи «Комплексна аналітична модель на хмарному сервері повідомлень із ознаками пріоритетів», керівник роботи Уривський Леонід Олександрович, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «30» березня 2020 р. № 924-с
2. Термін подання студентом роботи 12.06.2020
3. Вихідні дані до роботи
  - структурні схеми хмарних сервісів із застосуванням моделі Software as a Service (SaaS);
  - архітектура мережі 5G;
  - багатопотокові аналітичні моделі СМО;
  - опис дисциплін пріоритетного обслуговування;
  - 14 формул для оцінки якості обслуговування СМО (показники Літтла).
4. Зміст роботи
  1. Аналіз і порівняння параметрів безпріоритетних і пріоритетних СМО, що визначають якість обслуговування;

2. Характеристика хмарних технологій і місце проблеми доступу до телекомунікаційних ресурсів в них.
3. Аналіз впливу числа обслуговуючих приладів на показники СМО;
4. Аналіз впливу черги на показники СМО та порівняння характеристик якості обслуговування з СМО без черги;
5. Аналіз впливу пріоритетного обслуговування на показники СМО та порівняння характеристик якості обслуговування з безпріоритетними СМО
6. Виведення універсальної моделі для СМО з довільним числом приладів, потоків, місць для черги та при будь-якому пріоритеті.

#### 5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Слайд №1 «Тема, актуальність, мета, об'єкт, предмет та завдання бакалаврської дипломної роботи»

Слайд №2 «Проблема доступу до телекомунікаційних ресурсів в рамках хмарних обчислень»

Слайд №3 «Застосування теорії масового обслуговування в оцінці якості обслуговування заявок»

Слайд №4 «Структура СМО та її вплив на якість обслуговування заявок»

Слайд №5. «Методика розроблення комплексної математичної моделі з довільним числом обслуговуючих приладів, потоків та при різноманітних дисциплінах обслуговування»

Слайд №6. «Висновки та перспективи розвитку дипломної роботи»

6. Дата видачі завдання 9.09.2019

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури.	9.09.19 – 30.09.19	Вик.
2	Визначення об'єкту, предмету, мети.	7.10.19 – 21.10.19	Вик.
3	Написання першого розділу «Аналіз принципу роботи мультисервісних систем в хмарному середовищі».	4.11.19 – 01.12.19	Вик.

4	Написання другого розділу «Аналіз показників якості обслуговування систем масового обслуговування в залежності від рівнів структури СМО».	20.01.2020 – 10.02.2020	Вик.
5	Написання третього розділу «Розробка універсальної аналітичної моделі мультипоточної системи масового обслуговування з довільним числом обслуговуючих приладів, чергою та пріоритетним обслуговуванням».	24.02.2020 – 22.04.2020	Вик.
7	Написання висновків і остаточне оформлення роботи.	27.04.2020 – 16.05.2020	Вик.
8	Виготовлення графічного матеріалу	18.05.2020 – 05.06.2020	Вик.
9	Попередній захист роботи	10.06.2020	Вик

Студент

Керівник роботи

Катерина МАРТИНОВА

Леонід УРИВСЬКИЙ

## РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 90 с., 47 рис., 26 джерел.

Мета роботи – розробка комплексної аналітичної моделі обслуговування на хмарному сервері повідомлень із ознаками пріоритетів.

В даній роботі розглядається проблема доступу до ресурсів хмарного сервера, залежність кількісних і якісних показників якості обслуговування від структури системи масового обслуговування, здійснюється порівняння та аналіз пріоритетних та безпріоритетних систем масового обслуговування, визначаються закономірності побудови аналітичних моделей відповідних їм систем, на основі чого розробляється комплексна аналітична модель обслуговування на хмарному сервері повідомлень із ознаками пріоритетів.

ТЕОРІЯ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, СИСТЕМА МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, ХМАРНИЙ СЕРВЕР, ХМАРНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ПРОГРАМА ЯК ПОСЛУГА, ПРІОРИТЕТНІ ТА БЕЗПРІОРИТЕТНІ СМО, ДОСТУП ДО РЕСУРСІВ ХМАР

## ABSTRACT

The purpose of the work is to design a complex analytical model of priority requires service on a cloud server.

The problem of access to cloud server resources, quantitative and qualitative QoS characteristics dependences on queuing system (QS) structure likewise are reviewed. Comparison and analysis of queuing systems with priority service and non-priority QS are implemented. The regularities of analytical models design are defined and consequently, the complex analytical model of priority requires service on cloud server was designed.

QUEUEING THEORY, QUEUEING SYSTEM, CLOUD SERVER, CLOUD COMPUTING, SOFTWARE AS A SERVICE, PRIORITY AND NON-PRIORITY QUEUEING SYSTEMS, CLOUD RESOURCES ACCESS

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПУ РОБОТИ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ СИСТЕМ В ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	13
1.1 Огляд сучасних хмарних технологій та проблем їх реалізації.....	13
1.2 Огляд проблеми розподілу ресурсів в телекомунікаційних системах з конфліктом доступу .....	22
1.3 Огляд існуючих аналітичних моделей, спрямованих на аналіз кількісних показників якості обслуговування.....	25
1.4 Висновки до розділу 1 .....	27
2 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РІВНІВ СТРУКТУРИ СМО.....	29
2.1 Кількісний аналіз впливу на показники якості обслуговування числа обслуговуючих приладів .....	31
2.2 Кількісний аналіз впливу наявності місць для черги на показники якості обслуговування.....	37
2.3 Кількісний аналіз впливу на показники якості обслуговування вибору дисципліни обслуговування.....	54
2.4 Висновки до розділу 2 .....	66
3 РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОЇ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ МУЛЬТИПОТОКОВОЇ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ З ДОВІЛЬНИМ ЧИСЛОМ ОБСЛУГОВУЮЧИХ ПРИЛАДІВ, ЧЕРГОЮ ТА ПРІОРИТЕТНИМ ОБСЛУГОВУВАННЯМ.....	69
3.1 Комплексна аналітична модель для безпріоритетних СМО з довільним числом обслуговуючих приладів при різноманітних дисциплінах обслуговування.....	70

3.1.1 Комплексна аналітична модель для безпріоритетних СМО з довільним числом обслуговуючих приладів.....	70
3.1.2 Комплексна аналітична модель для СМО з довільним числом обслуговуючих пристроїв при пріоритетному обслуговуванні .....	74
3.2 Комплексна математична модель для СМО с 1 обслуговуючим приладом і N потоками.....	81
3.3 Методика розроблення комплексної математичної моделі з довільним числом обслуговуючих приладів, потоків та при різноманітних дисциплінах обслуговування.....	83
3.4 Висновки до розділу 3 .....	84
ВИСНОВКИ.....	86
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	88



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

QoS	– Quality of Service – якість обслуговування
СМО	– система масового обслуговування
ОП	– обслуговуючий прилад
CDN	– Content delivery network – мережа доставки контенту
5G	– 5 Generation – п'яте покоління мереж
IoT	– Internet of Things – Інтернет речей
IIoT	– Industrial Internet of Things – Індустріальний Інтернет речей
MEC	– Multi-Access Edge Computing – периферійні обчислення мультисервісного доступу
NFV	– Network Function Virtualization – віртуалізація функцій мережі
Massive IoT	– Massive Internet of Things – межмашинні комунікації
mMTC	– Massive Machine Type Communication –
API	– Application Programming Interface – інтерфейси прикладного програмування
D-RAN	– Distributed Radio Access Network – розподілена архітектура мережі мобільного доступу
C-RAN	– Centralized Radio Access Network – централізована архітектура мережі мобільного доступу
Cloud RAN	– Central Cloud – центральна хмара мережі мобільного доступу
RAT	– Radio Access Technology – технологія радіодоступу
SaaS	– Software as a Service – програма як послуга
СЛАР	– система лінійних алгебраїчних рівнянь
ЕОМ	– електронно-обчислювальна машина
$P_{\text{обсл}}$	– ймовірність обслуговування заявок
$P_{\text{відм}}$	– ймовірність відмови заявкам в обслуговуванні
$P_{\text{зан}}$	– ймовірність зайнятості системи обслуговуванням заявок
$P_0$	– ймовірність простою системи масового обслуговування

$P_{\text{черги}}$	– ймовірність перебування заявки в черзі
$Z_{\text{сист}}$	– середнє число заявок в системі
$K_{\text{обсл}}$	– обслужене навантаження системою масового обслуговування
$r_{\text{черги}}$	– середнє число заявок в черзі
$\tau_{\text{сист}}$	– середній час перебування заявки в системі
$\tau_{\text{обсл}}$	– середній час обслуговування заявки системою
$\tau_{\text{черги}}$	– середній час перебування заявки в черзі
$\frac{\tau_{\text{сист}}}{\tau_{\text{пов}}}$	– показник своєчасності системи
$Y_{\text{обсл}}$	– показник продуктивності системи
$\lambda$	– інтенсивність надходження заявок
$\mu$	– інтенсивність обслуговування заявок
$\rho$	– вхідне навантаження, ерл
$n$	– число обслуговуючих приладів в системі масового обслуговування
$r$	– число місць для черги в системі масового обслуговування
$m$	– число потоків в системі масового обслуговування
$P_0, P_1, P_2, \dots$	– ймовірності станів системи масового обслуговування
$N$	– число станів системи масового обслуговування

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний користувач надає перевагу мультисервісним системам як засобу задоволення своїх потреб у зберіганні та обробці даних, що потребує значного обсягу ресурсів.

Останні роки хмарні технології набрали стрімких обертів, оскільки мають в своєму розпорядженні великі запаси необхідних ресурсів з можливістю виконання потрібних користувачеві операцій без прив'язки до свого місцезнаходження. Проте, і ресурси "хмар" є вичерпними. Обмеженість ресурсів телекомунікаційних систем об'єктивно породжує конфлікт користувачів при спробі використати ці ресурси.

Очевидно, існує широке різноманіття систем масового обслуговування, призначених для різного кола задач. І в кожному випадку інженер телекомунікаційних систем стикається з аналізом кількісних і якісних характеристик систем масового обслуговування, з метою вибору найефективнішої моделі. Проте, навіть на сьогоднішній день не існує універсального методу розрахунку параметрів СМО, що позбавив би спеціаліста від рутинних алгебраїчних операцій.

**Мета дослідження** – розробка універсального аналітичного інструментарію для швидкого визначення кількісних характеристик систем масового обслуговування з довільною кількістю обслуговуючих пристроїв, потоків повідомлень та місць у черзі.

**Об'єкт дослідження** - системи масового обслуговування з довільним числом потоків та обслуговуючих приладів при різних дисциплінах обслуговування.

**Предмет дослідження** – математичний апарат, здатний визначити ефективність дослідженої моделі СМО.

Дане дослідження опирається на вже створену теоретичну і практичну базу науковців: Burce P.J, Crommelin C. D., Kleinrock L., O Dell G. F., Palm C., Полачек F., Wilkinson R. I. Істотний внесок у розвиток теорії телетрафіку внесли

представники радянської наукової школи: Хінчин О. Я., Башарин Р. П., Лівшиць Б. С., Харкевич А. Д., Севастьянов Б. А., Нейман Ст. І, Степанов С. Н., академіки НАН України Гніденко Б.В., Коваленко І.Н., професори українських ЗВО Стрелковская І.В., Лемешко О.В., Уривський Л.О. та інші.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання:

- отримання і порівняння параметрів безпріоритетних і пріоритетних СМО, що визначають якість обслуговування;
- виведення універсальної аналітичної моделі для безпріоритетних і пріоритетних систем масового обслуговування;
- аналіз впливу черги на показники СМО та порівняння характеристик якості обслуговування з СМО без черги;
- виведення універсальної моделі для СМО з довільним числом приладів, потоків, місць для черги та при будь-якому пріоритеті.

Реалізація кожного завдання відображена у розділах дипломного проекту.

В першому розділі розглядається прикладна задача, до якої застосовні теоретичні результати проведеного дослідження.

В другому розділі здійснюється дослідження залежності показників якості обслуговування (QoS) від структури системи масового обслуговування, а також надається оцінка якості обслуговування СМО при будь-якій її трансформації та аналіз отриманих результатів.

В третьому розділі розглядаються аналітичні моделі найпростіших СМО, визначаються закономірності в їх побудові, в результаті чого розробляється методика побудови комплексної математичної моделі з довільним числом обслуговуючих приладів, потоків з використанням пріоритетного обслуговування.

Загальний підсумок роботи полягає у формулюванні методики розроблення комплексної аналітичної моделі обслуговування на хмарному сервері повідомлень із ознаками пріоритетів.

## 1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПУ РОБОТИ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ СИСТЕМ В ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

### 1.1 Огляд сучасних хмарних технологій та проблем їх реалізації

Хмарні технології представляють собою важливий напрямок сучасних інформаційних технологій, оскільки являються ефективним рішенням щодо з питань підтримки обчислювальної інфраструктури для багатьох користувачів.

На відміну від класичних обчислювальних моделей, що у більшості випадків опираються на власні програмно-апаратні ресурси, хмарна модель складається з сервісів, клієнтів, контенту, що управляється централізовано і віртуальних машин.

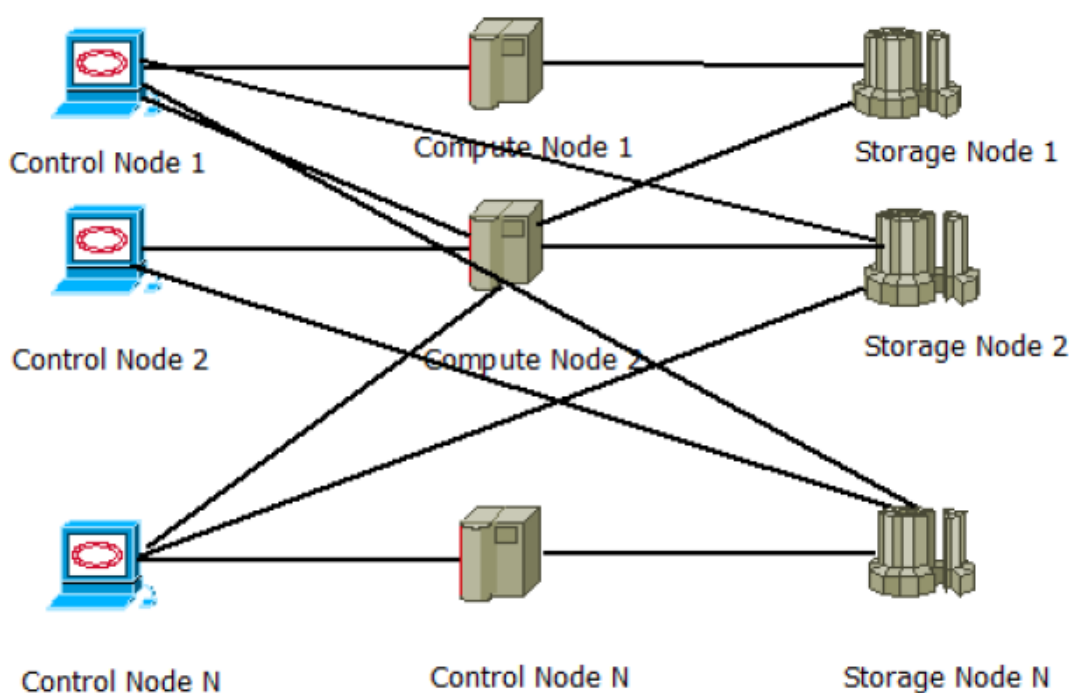


Рисунок 1.1 - Узагальнена схема хмарної інфраструктури

Хмарні обчислення (cloud computing) – модель надання можливості повсюдного і зручного мережевого доступу на вимогу до пулу поділюваних обчислювальних ресурсів, що конфігуруються (наприклад, мереж, серверів, засобів зберігання, додатків і сервісів), які можуть оперативно надаватися і

звільнятися при мінімальному зусиллі управління або взаємодії з провайдером. Ця модель хмари представлена п'ятьма основними характеристиками, трьома сервісними моделями і чотирма моделями розгортання.

Перехід до хмарних обчислень означає аутсорсинг традиційних процесів управління ІТ-інфраструктурою професійними зовнішніми постачальниками. Більшість сучасних постачальників рішень сфери хмарних обчислень надає можливість не тільки використовувати існуючі хмарні платформи, але і створювати власні, що відповідають технологічним і юридичним вимогам замовників.

Хмарні обчислення працюють наступним чином: замість придбання, інсталяції та управління власними серверами для запуску додатків, відбувається оренда сервера у Microsoft, Amazon, Google або іншої компанії. Далі користувач управляє своїми орендованими серверами через Інтернет, оплачуючи при цьому тільки фактичне їх використання для обробки і зберігання даних. Обчислювальні хмари складаються з тисяч серверів, розміщених в дата центрах, що забезпечують роботу десятків тисяч додатків, які одночасно використовують мільйони користувачів. Неодмінною умовою ефективного управління великомасштабною інфраструктурою є максимально повна автоматизація.

Традиційно, в хмарних обчисленнях традиційно виділяють три рівні:

- Інфраструктура як послуга.
- Платформа як послуга.
- Програма як послуга.

Програма як послуга (Software as a Service, SaaS) – модель поширення програм споживачам, при якій постачальник розробляє веб-програму, розміщує і керує нею самостійно з метою використання її замовниками через Інтернет.

Замовники платять за час користування програмою. Такий підхід має наступні переваги:

- Заощадження коштів замовників: користувач отримує стабільний і надійний сервіс за порівняно помірну ціну, не витрачаючи кошти на створення і розміщення додатку на власному сервері;

- Ефективне використання обчислювальних ресурсів постачальниками, оскільки програмний продукт не простоює;

Приклади SaaS: SaaS Accelerator, Office 365, now, box, veeva.

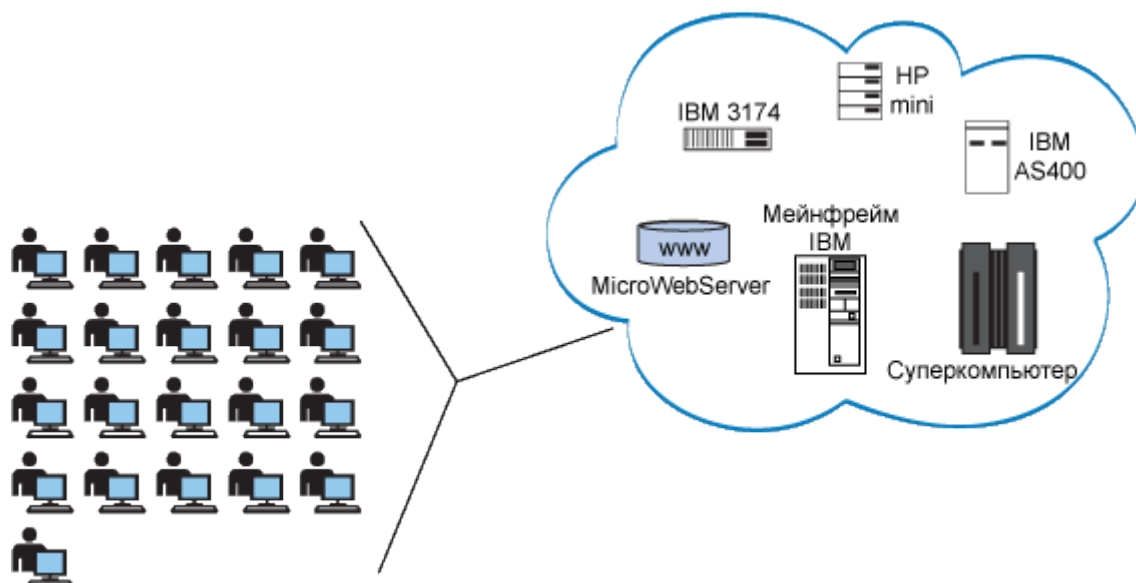


Рисунок 1.2 – Схема взаємодії клієнтських приладів SaaS

Завдяки своїй моделі веб-доставки, в SaaS відсутня необхідність завантаження та встановлення програм ІТ-персоналу на кожному персональному комп'ютері. Завдяки SaaS постачальники управляють потенційними технічними проблемами, такими як дані, проміжне програмне забезпечення, сервери та сховища, що забезпечує полегшене обслуговування та підтримку бізнесу.

SaaS надає численні переваги працівникам та компаніям, значно скорочуючи час і гроші, витрачені на рутинні завдання, такі як встановлення, управління та оновлення програмного забезпечення. Це звільняє багато часу, щоб технічний персонал витрачав на більш нагальні питання та проблеми в організації.

Існує кілька способів допомогти вам визначити, коли SaaS варто використовувати[3]:

- Управління з центральної точки;
- Розміщення на віддаленому сервері;

- Доступ через Інтернет;
- Користувачі не несуть відповідальність за апаратне або програмне забезпечення;

SaaS є найвигідним варіантом у наступних ситуаціях, включаючи[3]:

- Стартапи або невеликі компанії, яким потрібен швидкий розвиток електронної комерції і, що мають обмаль «часу на серверні проблеми або програмне забезпечення»[3];
- «Короткострокові проекти»[3], що потребують швидкої, простої та доступної співпраці;
- Рідко використовувані додатки, наприклад, податкове програмне забезпечення;
- «Програми, яким потрібен як Інтернет, так і мобільний доступ»[3].

SaaS принципи і концепції[3]:

- Сумісність. Кооперація з вже розробленими програмами та послугами може стати важливою проблемою, у випадку, коли програма SaaS не розроблена таким чином, щоб відповідати відкритим стандартам інтеграції. В такому разі компаніям може знадобитися розробити власні інтеграційні системи або уникати залежностей від сервісів SaaS, що не завжди є можливим.

• Блокування провайдера. Провайдер може полегшити процес підключення до послуги та ускладнити вихід з неї. Наприклад, дані можуть не бути перенесеними технічно чи економічно за допомогою сервісів SaaS від інших провайдерів, не несучи значних витрат або змінювати інженерні роботи в будинку. Не всі постачальники дотримуються стандартів API, протоколів та інструментів, але функції можуть бути необхідними для певних бізнес-завдань[3].

• Відсутність інтеграційної підтримки. Багато організацій відчують потребу в суттєвій інтеграції з локальними додатками, даними та послугами. Продавець SaaS може запропонувати обмежену підтримку в цьому випадку, «змушуючи організації вкладати внутрішні ресурси в розробку та управління інтеграцією»[3]. Складність інтеграції може значно обмежити використання SaaS-програми або інших пов'язаних сервісів.



- **Безпека даних.** Великі обсяги даних, можливо, доведеться обміняти в резервних центрах обробки даних сервісів SaaS, щоб забезпечити необхідну функціональність програмного забезпечення. Передача конфіденційної ділової інформації на сервіс SaaS, заснований на хмарних технологіях, «може призвести до погіршення безпеки та дотримання, крім значних витрат на міграцію великих навантажень даних»[3].

- **Налаштування.** Програми SaaS відрізняються мінімальними можливостями налаштування. Оскільки єдиного рішення для всіх не існує, користувачі можуть мати в своєму розпорядженні певні функціональні можливості, продуктивність та інтеграції, запропоновані постачальником. На противагу цьому, місцеві рішення, що постачаються з декількома інструментами для розробки програмного забезпечення, пропонують високу ступінь можливостей налаштування.

- **Відсутність контролю.** Рішення SaaS передбачає передачу контролю сторонньому постачальнику послуг. Елементи керування не обмежуються лише програмним забезпеченням - щодо версії, оновлень або зовнішнього вигляду - а також даними та управлінням. Таким чином, клієнти можуть зацікавитися удосконаленням своїх моделей захисту даних та керування, щоб «відповідати особливостям та функціональності послуги SaaS»[3].

- **Обмеження функцій.** Оскільки програми SaaS часто мають стандартизований вигляд, набір вибраних функцій може стати компрометуючим компромісом щодо безпеки, вартості, продуктивності чи іншої організаційної політики. Крім того, «проблеми з блокуванням, витратами чи безпекою для постачальників можуть означати, що в майбутньому неможливо переключити постачальників або служб на нові вимоги до функцій»[3].

- **Продуктивність та простота.** Оскільки «постачальник контролює та керує послугою SaaS, ваші клієнти тепер залежать від постачальників, щоб підтримувати безпеку та продуктивність послуги»[3]. Планові та непланові послуги з обслуговування, кібератаки або проблеми з мережею очікувано впливають на ефективність роботи сервісу SaaS, незважаючи на захист відповідного рівня угод про рівень обслуговування (SLA).

Office 365 - це розширена хмара Software-as-a-Service (SaaS), яка «забезпечує ефективну роботу та сценарії співпраці за допомогою різноманітного набору мікросервісів та додатків, таких як Exchange Online, SharePoint Online, Skype for Business Online, Microsoft Teams, Exchange Інтернет-захист, офіс у браузері та багато інших»[26].

Однією з найбільш значущих архітектурних особливостей Office 365 є те, що це справді широко розповсюджений сервіс в розумінні того, як користувачі підключаються до нього[26]. Розташування цільового орендаря Office 365 важливо для розуміння місця зберігання даних клієнта у хмарі, але досвід роботи з Office 365 не передбачає підключення безпосередньо до дисків, що містять дані. Досвід користувачів з Office 365 (включаючи продуктивність, надійність та інші важливі характеристики якості) передбачає можливість підключення через сильно розподілені вхідні двері служб, які масштабуються в сотнях локацій Microsoft по всьому світу. У більшості випадків найкращий досвід користувача досягається, дозволяючи клієнтській мережі направляти запити користувачів до найближчої точки входу в службу Office 365, а не підключатися до Office 365 через точку виходу в центральному місці чи регіоні.

Для більшості клієнтів користувачі Office 365 розповсюджуються у багатьох місцях. Для досягнення найкращих результатів принципи слід розглядати з точки зору масштабування, орієнтуючись на оптимізацію підключення до найближчої точки присутності в глобальній мережі Microsoft, а не на географічне розташування орендаря Office 365. Фактично, це означає, що, хоч дані орендаря Office 365 можуть зберігатися в певному географічному місці, можливість використання Office 365 для цього орендаря залишається розповсюдженим і може бути присутнім у мережевій відстані до кожного місця кінцевого користувача, який має орендар[26].

Основна тема дискусій серед провайдерів мобільного зв'язку – це перехід на мережі 5G. Впровадження мереж п'ятого покоління ознаменує перехід до безпрецедентних рівнів пропускну здатності, наднизьких мережових затримок і

наскрізного зв'язку, в якому мільярди пристроїв підключені до високонадійної мережі.

5G – це комплексний підхід до побудови розподілених хмарних архітектур, здатних стати основою для цілої множини розумних додатків і сервісів. 5G розширює проникнення і охоплення оптоволоконної транспортної інфраструктури, збільшуючи кількість клієнтів з споживчого та корпоративного сегментів, яким пропонуються інноваційні послуги – покращений мобільний інтернет, Інтернет речей, телемедицина, персоналізовані роботи, а також доповнена і віртуальна реальність (AR/VR).

Поширення 5G тягне за собою перехід від мереж з жорсткою апаратною структурою до мереж, функціонування яких визначається на програмному рівні: для їх адаптації для вирішення конкретних завдань не потрібно залучення додаткового обладнання та персоналу. Таким чином, робота операторів телекомунікаційних послуг відтепер буде максимально подібною роботі інтернет-компаній таких як Google, Yahoo, Netflix.

Сьогодні основна ставка в телекомунікаційному сегменті зроблена на технології віртуалізації функцій мережі (NFV) і хмарно-орієнтовані додатки. Цифровізація фізичних інфраструктур скорочує терміни, зменшує витрати і прискорює впровадження інновацій.

Основне зростання трафіку і доходів відбувається не в секторі пристроїв людей, а в секторі пристроїв інтернету речей, який є однією з базових цілей функціоналу 5G.

Мережі 5G значно розширюють обмежений функціонал мобільних мереж попередніх поколінь. Одним з основних функціональних особливостей мереж 5G є масивні межмашинні комунікації Massive IoT, mMTC (massive Machine Type Communication).

*Розумний будинок.* Цілий спектр різних сервісів інтернету речей (IoT) буде доступний для вирішення «Розумний будинок» (Smart Home) і «Розумна будівля» (Smart Building): відеоспостереження, управління та автоматизація побутової техніки, управління системами безпеки, сховища контенту, кліматика тощо.

Рішення «Розумне місто» – це горизонтальне і вертикальне масштабування функціоналу і спектра сервісів «Розумного будинку». Основні сервіси «Розумного міста»: Безпечне місто, електронний уряд (e-Government), електронна охорона здоров'я (e-Health), електронна освіта (e-Education), електронний банкінг (e-Bank), електронний збір свідчень ЖКГ (Smart Meters), «розумні електромережі» (Smart Grid), тощо.

Робота в хмарах. Сервіс дає можливість не тільки зберігати дані в хмарному сховищі і витягувати їх звідти, а й використовувати прикладні програми, які працюють безпосередньо з хмари. Причому, з можливістю їх використання на будь-якому пристрої і з будь-якого місця. Крім того, є можливість використання інтерфейсів прикладного програмування API, через які хмарні сервіс-провайдери можуть надавати свої послуги абонентам оператора мережі 5G.

Розглянемо загальну архітектуру мережі 5G (див. рис. 1). Для реалізації програмних функцій, крім віртуальних машин, також використовуються програмні контейнери (containers), програмна архітектура мікросервісів (microservice). Розподілена архітектура мережі мобільного доступу D-RAN (Distributed RAN) в мережах 4G поступово еволюціонує до централізований архітектурі C-RAN (Centralized RAN).

В архітектурі 5G функції опорної мережі реалізуються в центральній хмарі Central Cloud (Cloud RAN), на віртуальних машинах VM. Важливу роль у розвитку мереж 5G гратимуть також гранична хмара (Edge Cloud), зокрема, технологія MEC, а також Fog Cloud. Віртуалізація мережі на базі NFV/SDN необхідна також для дуже корисної функції 5G: логічної мережеві слайси (Network Slicing).

Технологія Network Slicing дозволяє на базі єдиного обсягу мережевих ресурсів здійснювати логічний поділ мереж для різних типів послуг 5G, яким потрібні різні технології радіодоступу RAT (Radio Access Technology), з різними характеристиками середовищ передачі даних. Це, наприклад, послуги:

- Високоякісне відео UHD;
- Голосові послуги (5G Voice);

- Інтернет речей з великою кількістю датчиків, сенсорів і виконавчих пристроїв (Massive IoT);

Інтернет речей для відповідальних додатків, таких, наприклад, як безпілотний транспорт, електронна медицина і багато інших.

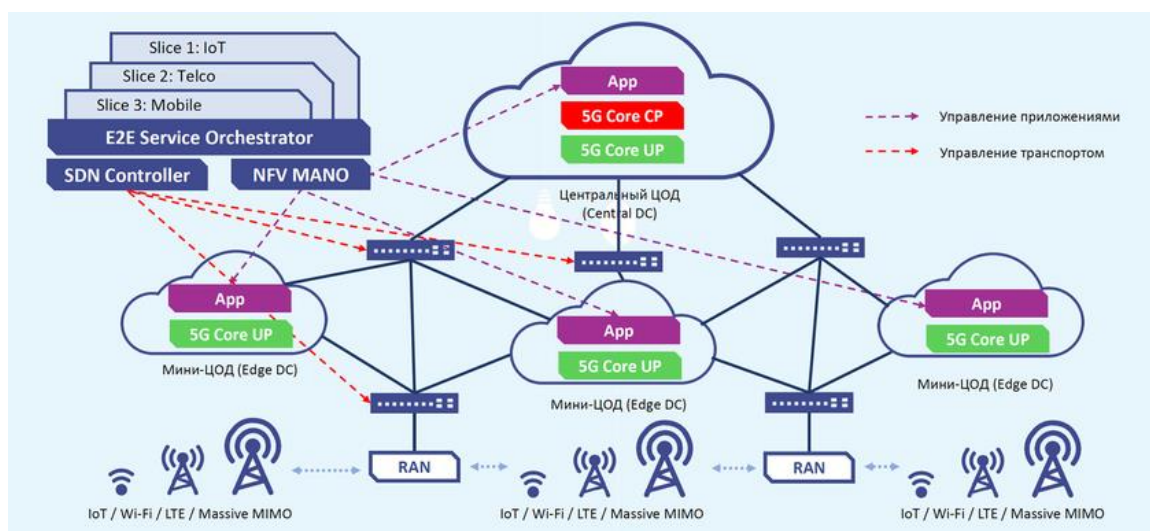


Рисунок 1.3 – Загальна архітектура мережі 5G

Всі ці послуги, що надаються на базі технології Network Slicing працюють на єдиній фізичній інфраструктурі дата-центрів центральної та граничної хмари, а також «туманної» інфраструктури (Fog Computing), необхідної для Massive IoT і промислового інтернету речей IIoT (Industrial IoT).

Це дає можливість багаторазового використання створеної колись програмно-апаратної інфраструктури, а також гнучке перепризначення її наявних ресурсів. Крім того, такий підхід дозволяє знизити не тільки капітальні витрати на будівництво мережі, а й операційні витрати на її обслуговування

Реалізація концепції Інтернету речей багато в чому стане можливою завдяки стандарту 5G і програмно-визначеним периферійним хмар. За рахунок таких технологій підвищиться ефективність і рівень автоматизації промислового виробництва, буде сформовано розумне міське господарство шляхом оптимізації систем енергопостачання і транспорту.

В майбутньому 5G і периферійні обчислення стануть основою хмарних додатків, які в свою чергу забезпечать повномірне розгортання технологій Інтернету речей. Постачальники послуг використовуватимуть їх переваги для побудови систем штучного інтелекту, машинного навчання та аналітики великих даних. В еру 5G величезні обсяги даних будуть оброблятися безпосередньо на периферії бездротової мережі без необхідності використання центрів обробки даних, і зараз силами телеком-операторів активно розвиваються периферійні хмари і обчислення мультисервісного доступу.

Отже, предметом нашого інтересу становлять наступні сервіси:

- Масивні межмашинні комунікації Massive IoT/IIoT, mMTC;
- Хмарні сервіси (SaaS).

## 1.2 Огляд проблеми розподілу ресурсів в телекомунікаційних системах з конфліктом доступу

Зважаючи на перелік позитивних перспектив, що відкриваються перед людиною XXI століття, не варто забувати про проблеми реалізації та вдосконалення нових технологій. Наприклад, кібербезпека і досі є слабкою ланкою, що потребує чималої кількості доопрацювань, проте дана дипломна робота присвячена іншій, не менш важливій проблемі, – розподілу ресурсів.

Питання розподілу ресурсів, насамперед, є широким і стосується багатьох аспектів людської життєдіяльності: екологія, фінанси, медицина тощо. Очевидно, увага буде зосереджена на ресурсах телекомунікаційних систем.

Перш за все, варто визначити що включає в себе поняття «ресурси телекомунікаційних систем», а також, які їх типи існують.

Ресурси телекомунікаційних систем – це запас засобів, призначених для повноцінного функціонування телекомунікаційної системи. Складовими компонентами ресурсів телекомунікаційних систем є:

- частотний ресурс;
- енергетичний ресурс;

- часовий ресурс;
- канальний ресурс.

Канальний рівень (Data link layer) визначає правила доступу до фізичного середовища й управляє передачею інформації по каналу, здійснюючи формування сигналу про початок передачі й організовуючи початок і власне передачу інформації зі створенням сигналу закінчення передачі й наступним переведенням каналу в пасивний стан.

У деяких випадках цей рівень здійснює спостереження за швидкістю обміну і закінченням інформаційних блоків, а також управляє фізичним ланцюгом при його мультиплексорному використанні.

На канальному рівні головним об'єктом є часовий ресурс. Розрахунок часу дозволяє визначити абонентам, в який момент часу почати розмову, скільки часу очікувати на відповідь. Часові параметри впливають на кількість відправленої інформації і швидкість доставки. При відправці даних по мережі вузол-відправник може передавати повідомлення швидше, ніж вузол-приймач їх отримує і обробляє. Управління потоком дозволяє вузлу-відправнику і вузлу призначення узгоджувати час для успішного зв'язку.

Справа в тому, що з плином часу кількість користувачів мультисервісних систем стрімко зростає разом із їх потребами в покращенні якості обслуговування: надвисокі швидкості передачі даних, величезні обсяги пам'яті для збереження інформації, швидкодія телекомунікаційних систем тощо. При тому користувачі, в свою чергу, поділяються на більш і менш вибагливих: перший тип жадає отримати якомога більше якісних послуг і готовий за них платити, другий – задовольняє власні потреби більш скромними благами за менші кошти. Проте загальна тенденція показує, що обидва типи користувачів йдуть шляхом підвищення вимог до якості обслуговування. Натомість, ресурси телекомунікаційних систем є вичерпними і, очевидно, виникає боротьба за право користуватися ними. Таким чином, впливає проблема доступу до ресурсів, що породжує ряд задач для інженера телекомунікаційних систем. В ході вирішення

даних задач, фахівець з питань телекомунікацій має вирішити, чим варто пожертвувати задля загального блага всіх користувачів.

Хмарний сервер – це послуга на базі хмарних технологій, що надає доступ до серверних ресурсів компанії-провайдера.

За своїми можливостями хмарний сервер ідентичний його фізичному аналогу. Але у користувачів хмарних серверів є можливість коригувати їх потужність на свій розсуд.

Всі персональні дані, профілі і окремі файли зберігаються на сервері. Як результат, можлива паралельна робота декількох користувачів з додатками або інформацією.

Для роботи з програмними рішеннями та інформацією на хмарному сервері необхідно тільки наявність інтернет-підключення.

Національним інститутом стандартів і технологій США зафіксовані такі обов'язкові характеристики хмарних обчислень[1]:

- Самообслуговування за потребою (англ. Self service on demand) - споживач самостійно визначає свої обчислювальні потреби: серверний час, швидкості доступу та обробки даних, обсяг збережених даних - без взаємодії з представником постачальника послуг;
- Універсальний доступ до мережі - послуги доступні споживачам через мережу передачі даних незалежно від використовуваного термінального пристрою[1];
- Об'єднання ресурсів (англ. Resource pooling) - постачальник послуг об'єднує ресурси для обслуговування великого числа споживачів в єдиний пул для динамічного перерозподілу потужностей між споживачами в умовах постійної зміни попиту на потужності; при цьому споживачі контролюють тільки основні параметри послуги (наприклад, обсяг даних, швидкість доступу), але фактичний розподіл ресурсів, що надаються споживачеві, здійснює постачальник (в деяких випадках споживачі все-таки можуть управляти деякими фізичними параметрами перерозподілу, наприклад, вказувати бажаний центр обробки даних з міркувань географічної близькості)[1];



- Еластичність - послуги можуть бути надані, розширені, звужені в будь-який момент часу, без додаткових витрат на взаємодію з постачальником, як правило, в автоматичному режимі[1];
- Облік споживання - постачальник послуг автоматично обчислює спожиті ресурси на певному рівні абстракції (наприклад, обсяг збережених даних, пропускна здатність, кількість користувачів, кількість транзакцій) і на основі цих даних оцінює обсяг наданих споживачам послуг[1].

З точки зору постачальника, завдяки об'єднанню ресурсів і непостійного характеру споживання з боку споживачів, хмарні обчислення дозволяють економити на масштабах, використовуючи менші апаратні ресурси, ніж були потрібні б при виділених апаратних потужностях для кожного споживача, а за рахунок автоматизації процедур модифікації виділення ресурсів істотно знижуються витрати на абонентське обслуговування.

З точки зору споживача ці характеристики дозволяють отримати послуги з високим рівнем доступності і низькими ризиками непрацездатності, забезпечити швидке масштабування обчислювальної системи завдяки еластичності без необхідності створення, обслуговування і модернізації власної апаратної інфраструктури.

Зручність і універсальність доступу забезпечується широкою доступністю послуг і підтримкою різного класу термінальних пристроїв (персональних комп'ютерів, мобільних телефонів, інтернет-планшетів)[1].

Отже, визначено, що на каналному рівні моделі OSI увага акцентується на часовому ресурсі.

### 1.3 Огляд існуючих аналітичних моделей, спрямованих на аналіз кількісних показників якості обслуговування

На каналному рівні конфлікт інтересів користувачів під час спроби використати ресурси телекомунікаційних систем проявляється в процедурі доступу до каналів телекомунікацій.

Головними задачами каналного рівня в такому випадку виступають задачі доступу, заняття каналу, перебування каналу в стані зайнятості і роз'єднання.

Задача дослідження каналів телекомунікацій на каналному рівні в рамках прикладної теорії інформації для телекомунікацій полягає в тому, щоб обрати і використовувати адекватні моделі для опису і визначення кількісних характеристик систем передачі інформації з точки зору доступу до каналів телекомунікацій.

Практика моделювання процедур доступу до каналів телекомунікацій показала, що найбільш адекватними виявляються моделі, побудовані в рамках теорії масового обслуговування.

Теорія масового обслуговування займається вивченням випадкових процесів, що протікають в системах масового обслуговування. За допомогою теорії масового обслуговування вирішуються наступні задачі[5]:

- Визначення ймовірностей будь-яких станів СМО, спираючись на умову нормування;
- Встановлення залежностей між заданими параметрами (числом каналів, інтенсивністю потоку заявок, розподілом часу обслуговування і т.д.) та характеристиками ефективності роботи СМО.

Мета теорії масового обслуговування – формулювання рекомендацій з раціональної побудови СМО, раціональної організації їх роботи і регулювання потоку заявок для забезпечення високої ефективності функціонування СМО[7].

Таким чином, ототожнюючи характеристики телекомунікаційної системи та відповідну їй СМО, можна сформулювати рекомендації щодо раціональної побудови і раціональної організації роботи систем передачі інформації на каналному рівні при відомій сукупності ресурсів каналів телекомунікацій.

Характеристики телекомунікаційної системи виражені в 14 формулах Літтла[6]:

Нехай, СМО має  $N$  станів,  $n$  з яких – кількість станів ймовірності того, що обслуговуючий прилад зайнято,  $m$  – кількість місць для черги. Звідси  $N = n + m$ .

Умова нормування:

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1 \quad (1.1)$$

$$P_{\text{обсл}} + P_{\text{відм}} = 1 \quad (1.2)$$

$$P_{\text{обсл}} = \sum_{i=0}^{N-1} P_i, P_{\text{відм}} = P_N \quad (1.3)$$

$$P_{\text{исп}} + P_0 = 1 \quad (1.4)$$

$$P_{\text{исп}} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (1.5)$$

$$P_{\text{исп}} = P_{\text{обсл}} + P_{\text{черги}} \quad (1.6)$$

$$Z_{\text{сист}} = K_{\text{обсл}} + r_{\text{черги}} \quad (1.7)$$

$$\tau_{\text{сист}} = \tau_{\text{обсл}} + \tau_{\text{черги}} \quad (1.8)$$

$$\tau_{\text{сист}} = \frac{Z_{\text{сист}}}{\lambda} \quad (1.9)$$

$$\tau_{\text{обсл}} = \frac{K_{\text{обсл}}}{\lambda} \quad (1.10)$$

$$\tau_{\text{черги}} = \frac{r_{\text{черги}}}{\lambda} \quad (1.11)$$

$$\frac{\tau_{\text{сист}}}{\tau_{\text{пов}}} = \left( \frac{Z_{\text{сист}}}{\lambda} \right) * \mu = \frac{Z_{\text{сист}}}{\rho} \quad (1.12)$$

$$Y_{\text{обсл}} = \sum_{i=1}^n i * P_{\text{обсл}i} = K_{\text{обсл}} \quad (1.13)$$

$$Y_{\text{обсл}} = P_{\text{обсл}} * \rho \quad (1.14)$$

$$\text{Sup}\{Y_N\} = (N * P_N) \rightarrow N, \text{ де } P_N \rightarrow 1 \text{ при } \lambda \rightarrow \infty \quad (1.15)$$

Отже, ми маємо 14 показників для кількісної оцінки результатів функціонування систем масового обслуговування.

#### 1.4 Висновки до розділу 1

1. Хмарні технології представляють собою важливий напрямок сучасних інформаційних технологій, оскільки являються ефективним рішенням щодо з питань підтримки обчислювальної інфраструктури для багатьох користувачів.

2. Програма як послуга (Software as a Service, SaaS) – компонента хмарної організації обчислень – це модель поширення програм споживачам, при якій постачальник розробляє веб-програму, розміщує і керує нею самостійно з метою використання її замовниками через Інтернет. Замовники платять за час користування програмою. Такий підхід гарантує заощадження грошей замовників, ефективне використання обчислювальних ресурсів постачальниками шляхом зведення часу простою сервісу до нуля.

3. Прикладом доцільного використання хмарні технології є нове покоління стільникового зв'язку 5G, в якому впроваджено комплексний підхід до побудови розподілених хмарних архітектур, здатних стати основою для численних розумних додатків і сервісів. В майбутньому 5G і периферійні обчислення стануть основою хмарних додатків, які в свою чергу забезпечать широкомасштабне розгортання технологій Інтернету речей.

4. Ресурси телекомунікаційних систем – це запас засобів, призначених для повноцінного функціонування телекомунікаційної системи. Види ресурсів телекомунікаційних систем: частотний ресурс, енергетичний ресурс, часовий ресурс, каналний ресурс. На каналному рівні головним об'єктом є часовий ресурс.

5. Задача дослідження каналів телекомунікацій на каналному рівні в рамках прикладної теорії інформації для телекомунікацій полягає в тому, щоб обрати і використовувати адекватні моделі для опису і визначення кількісних характеристик систем передачі інформації з точки зору доступу до каналів телекомунікацій.

6. Ототожнюючи характеристики телекомунікаційної системи та відповідну їй СМО, формулюють рекомендації щодо раціональної побудови і організації роботи систем передачі інформації на каналному рівні при відомій сукупності ресурсів каналів телекомунікацій. Характеристики телекомунікаційної системи відображено в 14 показниках із формул Літтла.

## 2 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РІВНІВ СТРУКТУРИ СМО

В даному розділі розглянемо динаміку показників якості обслуговування в залежності від структури графічної моделі СМО. Досліджуються найпростіші системи масового обслуговування з поступовим нарощуванням обслуговуючих приладів, потоків та місць для черг, а також особлива увага надається порівнянню дисциплінам обслуговування.

Нехай, потоки заявок поділяються на два типи: 1-ий потік заявок – заявки вищого пріоритету з вхідними параметрами  $\lambda_1$ ,  $\mu_1$ ; 2-ий потік заявок – заявки нижчого пріоритету з вхідними параметрами  $\lambda_2$ ,  $\mu_2$ . На рис. 2.1 та 2.2 наведені графічні моделі уніфікованих СМО, показники якості обслуговування яких порівнюються у даному розділі. Для оцінки якості обслуговування скористаємося чотирнадцятьма показниками Літтла, зазначених у третьому пункті першого розділу.

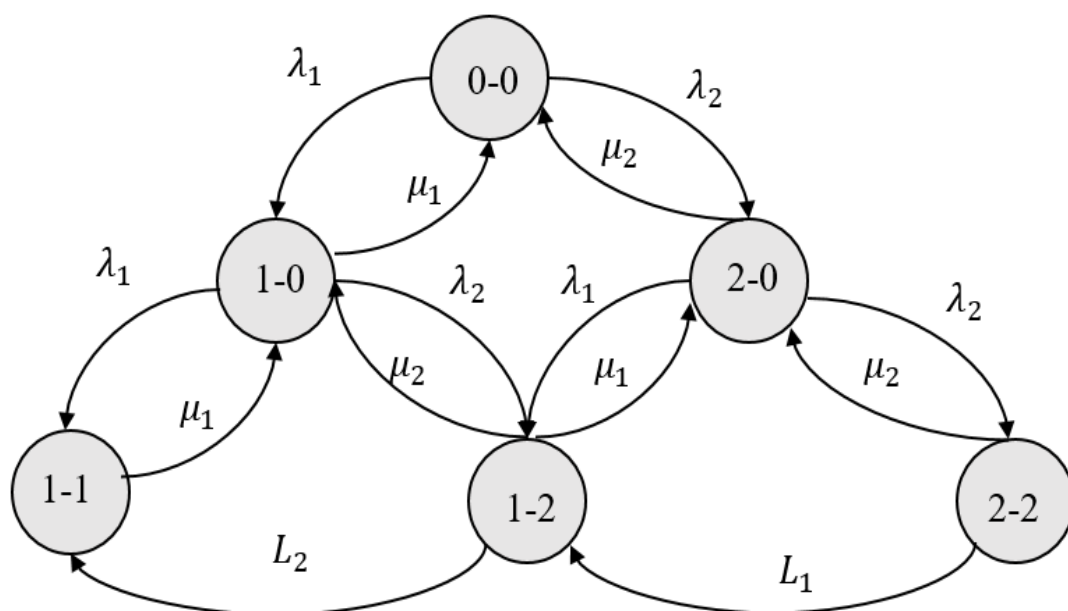


Рисунок 2.1 – Уніфікована СМО з двома потоками, одним обслуговуючим приладом та чергою

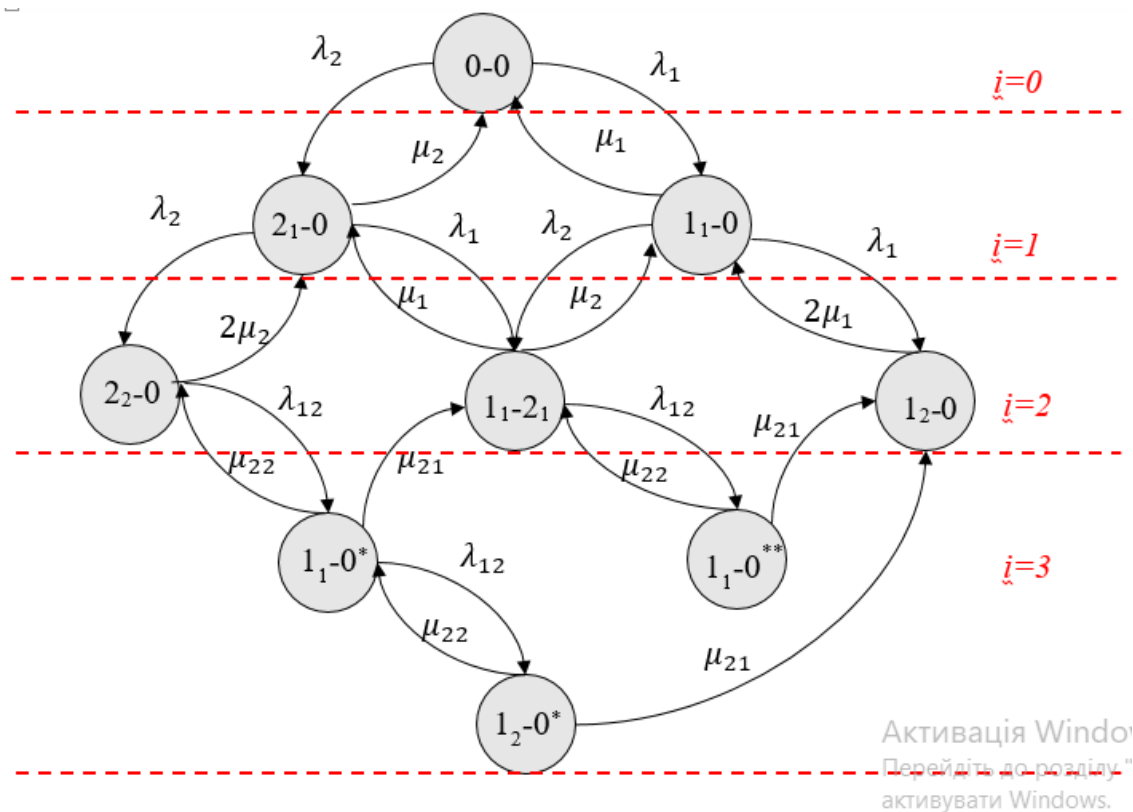


Рисунок 2.2 – Уніфікована СМО з двома потоками та двома приладами обслуговування

Незалежно від вигляду СМО, її структуру можна представити наступними рівнями:

- $i=0$ : система вільна від обслуговування заявок;
- $i=1 \dots n$ : зайнято  $1 \dots n$  обслуговуючий прилад;
- $i=n+1 \dots m$ : зайняті місця в черзі на обслуговування; також може бути наявний рівень пріоритетів (заявки «вступають в боротьбу» за місце в черзі).

Визначимо, яку роль у динаміці показників QoS відіграє кожен із цих рівнів. Таким чином, варто поставити ряд відповідних запитань:

1. Як впливає на показники якості обслуговування кількість обслуговуючих приладів?
2. Як впливає наявність місць для черги на показники якості обслуговування?
3. Як впливає на показники якості обслуговування вибір дисципліни обслуговування?

## 2.1 Кількісний аналіз впливу на показники якості обслуговування числа обслуговуючих приладів

Очевидно, найпростішим способом покращити показники якості обслуговування є збільшення числа обслуговуючих приладів. Проте чи є такий спосіб ефективним як для постачальника телекомунікаційних послуг, так і для користувача? На рис. 2.3 та 2.4 зображені графічні моделі безпріоритетних СМО з двома потоками заявок.

Безпріоритетні системи не доцільно використовувати при великих вхідних навантаженнях на СМО, оскільки під час надходження заявки в момент відсутності вільних обслуговуючих пристроїв, заявка втрачається, адже їй відмовляють в обслуговуванні. Основною кількісною оцінкою якості обслуговування при цьому є ймовірність втрати заявки.

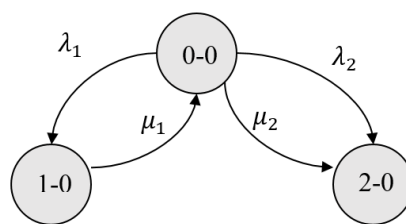


Рисунок 2.3 - Безпріоритетна СМО з одним обслуговуючим приладом та двома потоками

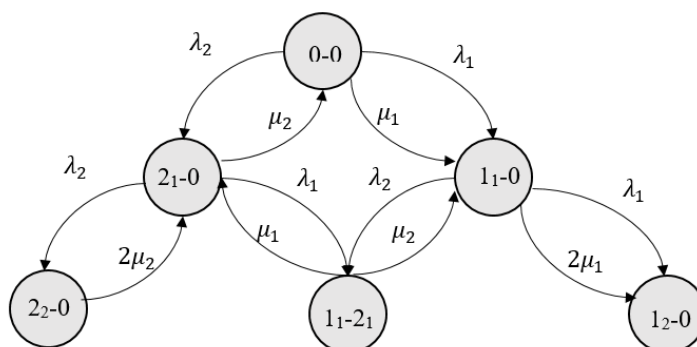


Рисунок 2.4 - Безпріоритетна СМО з двома обслуговуючими приладами та двома потоками

Одним з найважливіших показників якості обслуговування в теорії телетрафіку є ймовірність відмови в обслуговуванні. В загальному випадку зі зростанням вхідного навантаження на телекомунікаційну систему ймовірність відмови наближається до 1 (100%).

Очікувано, СМО з одним обслуговуючим приладом має вищі значення ймовірності втрати заявок (рис. 2.5). Проте зі зростанням інтенсивності надходження заявок першого потоку, ймовірність відмови заявкам другого потоку зменшується, що є цілком очікувано.

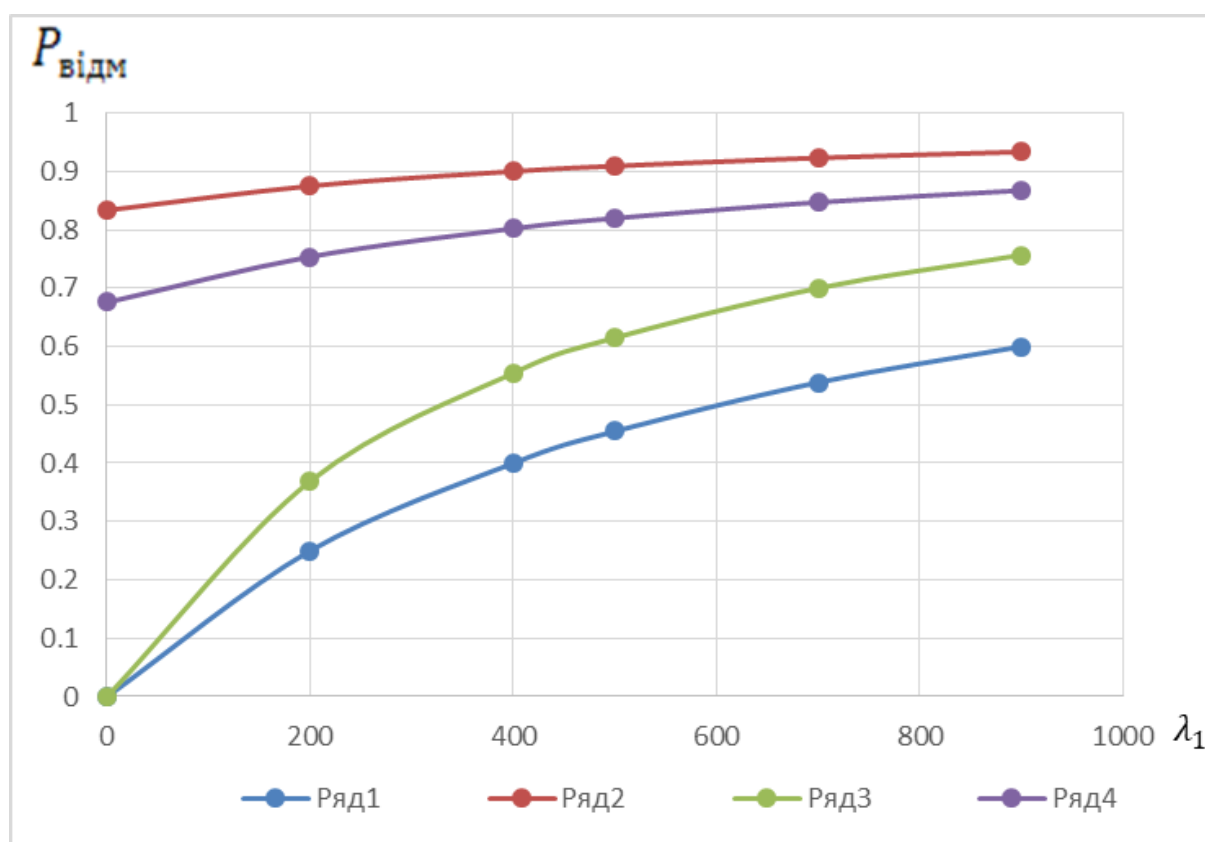


Рисунок 2.5 – Графік динаміки показника ймовірності відмови в обслуговуванні заявок в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го потоку

Перший показник Літтла (1.2) виражає тісний зв'язок показника ймовірності відмови та ймовірності обслуговування. З рис. 2.6 очевидно, що ймовірність обслуговування заявок вища в системі з двома обслуговуючими приладами. На рис. 2.6 характер динаміки ймовірності обслуговування заявок другого потоку є оберненим, тобто при зростанні інтенсивності вхідного потоку заявок першого



типу ймовірність обслуговування заявок другого типу, зменшується, що є цілком закономірно, адже в безпріоритетних СМО кращі показники якості обслуговування отримує активніший потік заявок.

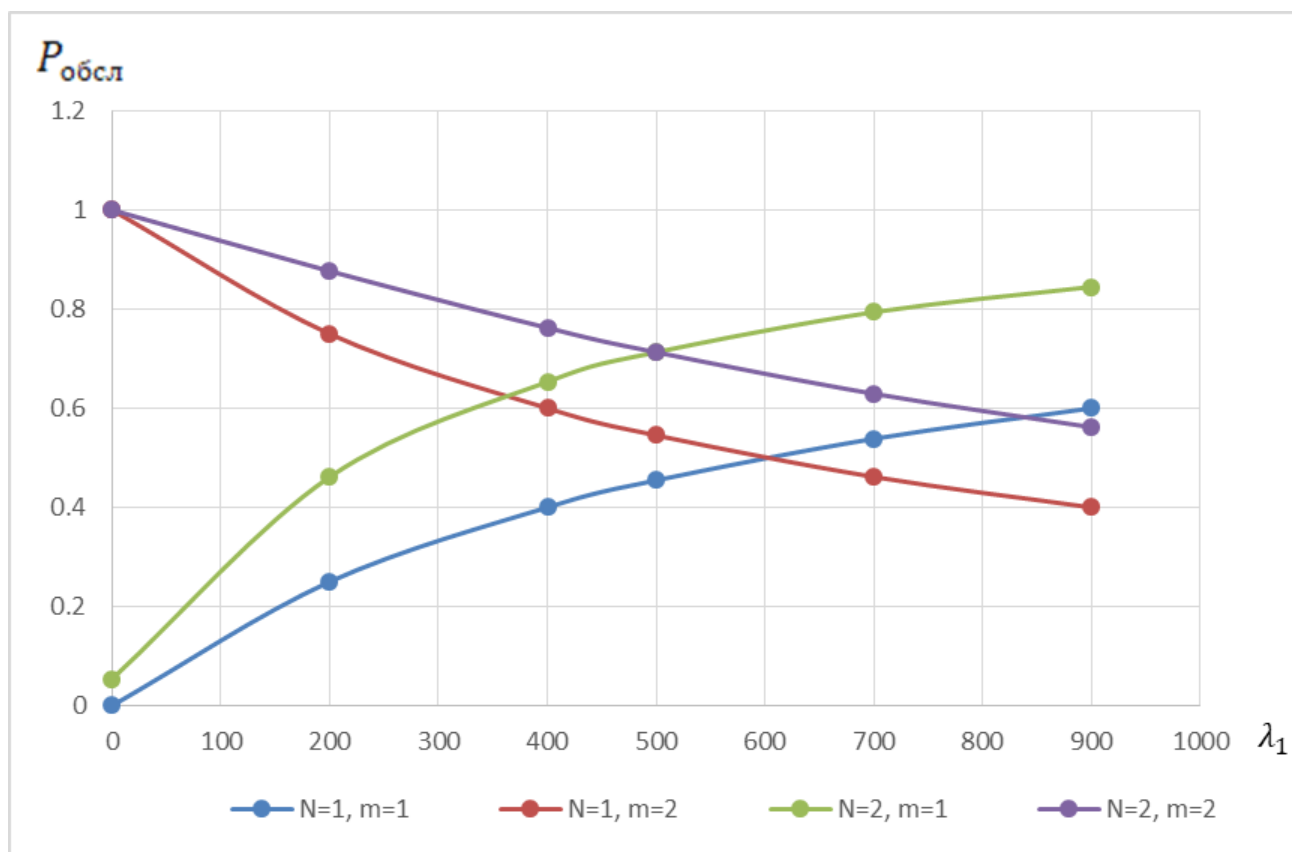


Рисунок 2.6 – Графік динаміки показника ймовірності обслуговування заявок в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го потоку

Ймовірність зайнятості системи ( $P_{\text{зан}}$ ) – вірогідність того, чи працюватиме система. На рис. 2.7 спостерігаємо динаміку даного показника в залежності від зростання інтенсивності вхідного потоку заявок. З рис. 2.7 видно, що система з двома обслуговуючими приладами має значно вищі показники, що і не дивно, оскільки система з більшою кількістю обслуговуючих приладів здатна обробити більше заявок. Ймовірність зайнятості системи заявками другого потоку монотонно зменшується зі зростанням інтенсивності  $\lambda_1$ , що дає змогу впевнитися у тому що в безпріоритетних моделях найактивніший потік отримує найвищі показники якості обслуговування.

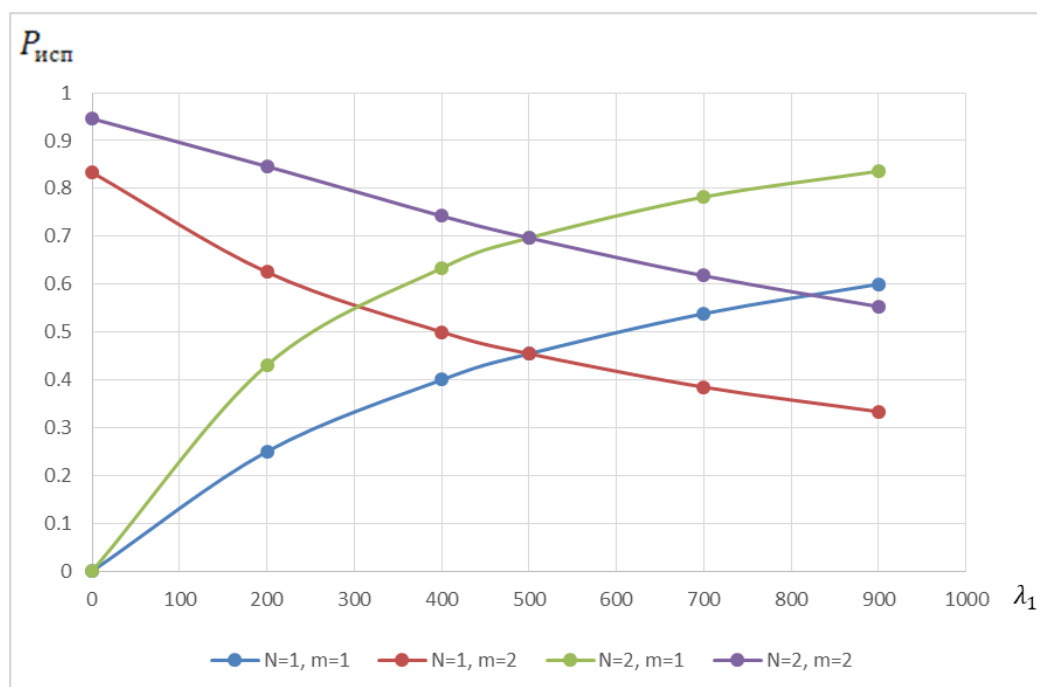


Рисунок 2.7 – Графік динаміки показника ймовірності зайнятості системи заявками в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го потоку

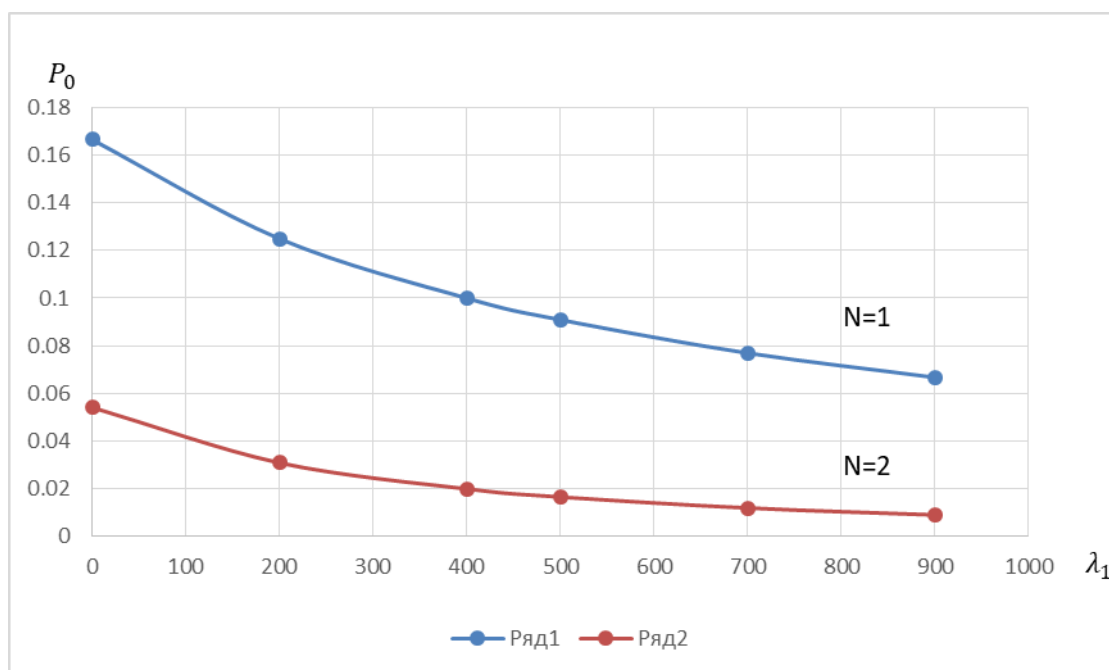


Рисунок 2.8 - Графік динаміки показників ймовірності простою системи для безпріоритетних СМО з  $N=1$  та  $N=2$  в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го потоку

З рис. 2.8 видно, що імовірність простою системи СМО з  $N=1$  вища, що обумовлено високою ймовірністю відмови в обслуговуванні заявок через нестачу обслуговуючих приладів. Загалом, зі зростанням інтенсивності надходження заявок першого потоку  $\lambda_1$  графіки на рис. 2.8 мають монотонно спадний характер, оскільки чим більше вхідне навантаження надходить до СМО, тим менша вірогідність того, що система буде вільна.

Перейдемо до показника середнього числа заявок в системі ( $Z_{\text{сист}}$ ). На рис. 2.9 спостерігається перевага СМО з двома обслуговуючими приладами як у випадку з першим, так і другим потоками заявок. Проте різниця незначна: при максимальній інтенсивності надходження заявок  $\lambda_1=900$  СМО з двома обслуговуючими приладами має в середньому на 1,8 заявки більше, ніж СМО з одним ОП. При розгляді другого потоку заявок, різниця складає 0,9 заявки на користь СМО з двома ОП.

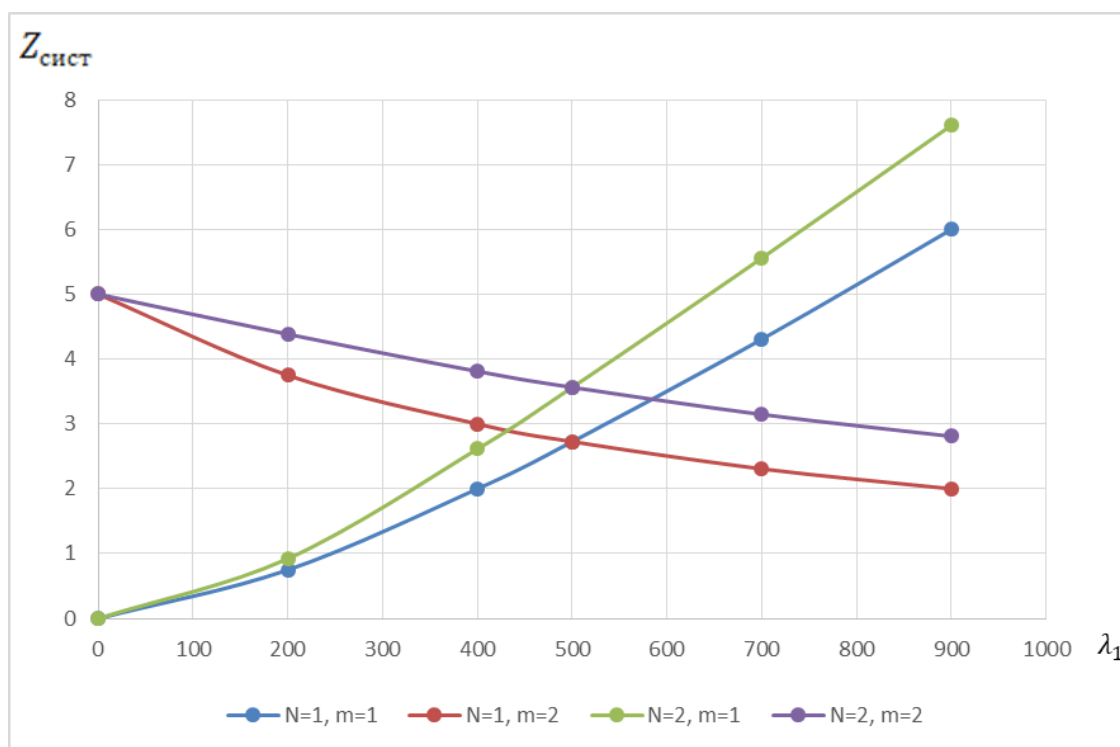


Рисунок 2.9 - Графік динаміки показника середнього числа заявок в системі в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го потоку

Показники обслуженого навантаження є ідентичними до показників середнього числа заявок в системі, адже з шостої формули Літтла випливає, що  $Z_{\text{сист}} = K_{\text{обсл}}$ , оскільки розглянуті системи не мають місць для черги ( $r_{\text{черги}}=0$ ,  $\tau_{\text{черги}}=0$ ).

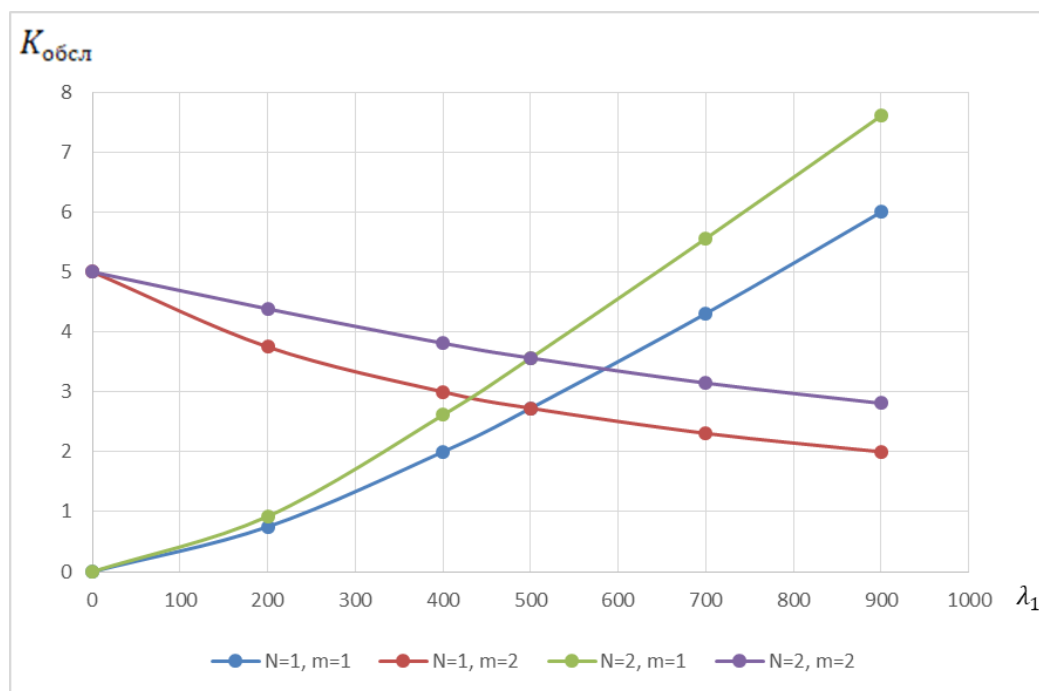


Рисунок 2.10 - Графік динаміки показника обслуженого навантаження системою в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го потоку

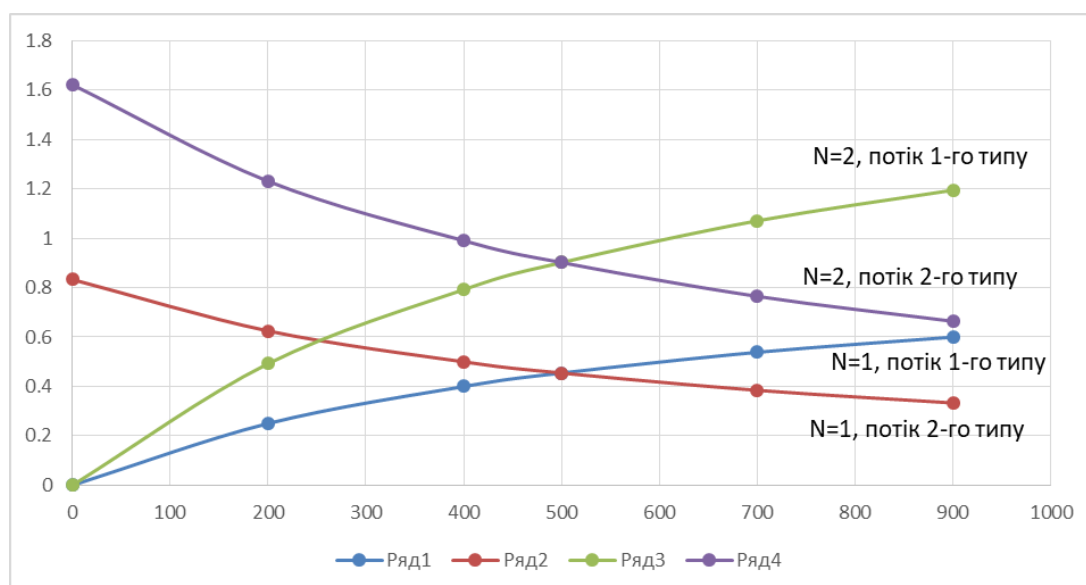


Рисунок 2.11 - Графік динаміки показників продуктивності з  $N=1$  та  $N=2$  в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

На рис. 2.11 спостерігається значна перевага в показниках продуктивності СМО з двома приладами обслуговування в порівнянні зі СМО з одним приладом. Без сумнівів, СМО з двома обслуговуючими приладами здатна обробити більшу кількість заявок, ніж СМО лише з одним приладом. Проте якщо мова йде про десятки, сотні абонентських приладів, провайдеру телекомунікаційних послуг варто замислитися над показниками ймовірності простою системи[2].

Отже, збільшення числа обслуговуючих приладів впливає на показники QoS наступним чином:

- Продуктивність СМО значно збільшується;
- Ймовірність простою системи зменшується, а ймовірність зайнятості СМО навпаки збільшується;
- Зі збільшенням вхідного навантаження ймовірність відмови завжди наближена до 1, при цьому ймовірність обслуговування зростає;
- Збільшується середня кількість заявок в системі, проте перевага в даному випадку незначна. Також, через відсутності місць для черги показники середнього числа заявок і обслуженого навантаження збігаються  $Z_{сист} = K_{обсл}$ .

## 2.2 Кількісний аналіз впливу наявності місць для черги на показники якості обслуговування

Використання черг усуває проблеми перевантаження у моменти бурхливого зростання інтенсивності трафіка. Однак при переповненні черги пакети втрачаються і втрата вже 10% пакетів суттєво впливає на продуктивність мережі. Якщо для недопущення переповнення збільшити розмір черги, то це суттєво впливає на середній час затримки пакетів та її нерівномірність (джитер)[8].

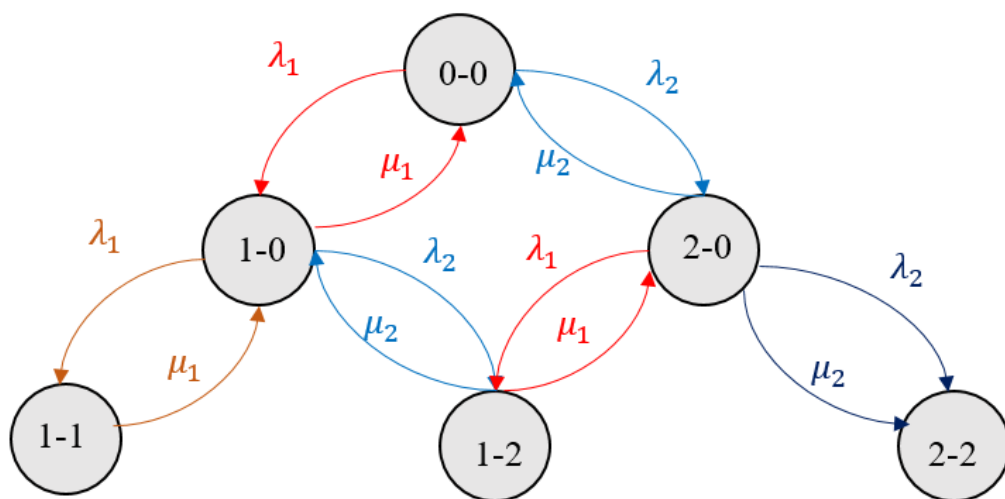


Рисунок 2.12 - Безпріоритетна СМО з одним приладом, двома потоками та чергою

Порівняємо, як наявність місць для черги вплинула на показники якості обслуговування СМО. Для цього розглянемо безпріоритетні моделі з одним обслуговуючим приладом без черги (рис. 2.3) та з місцями для черги (рис. 2.12).

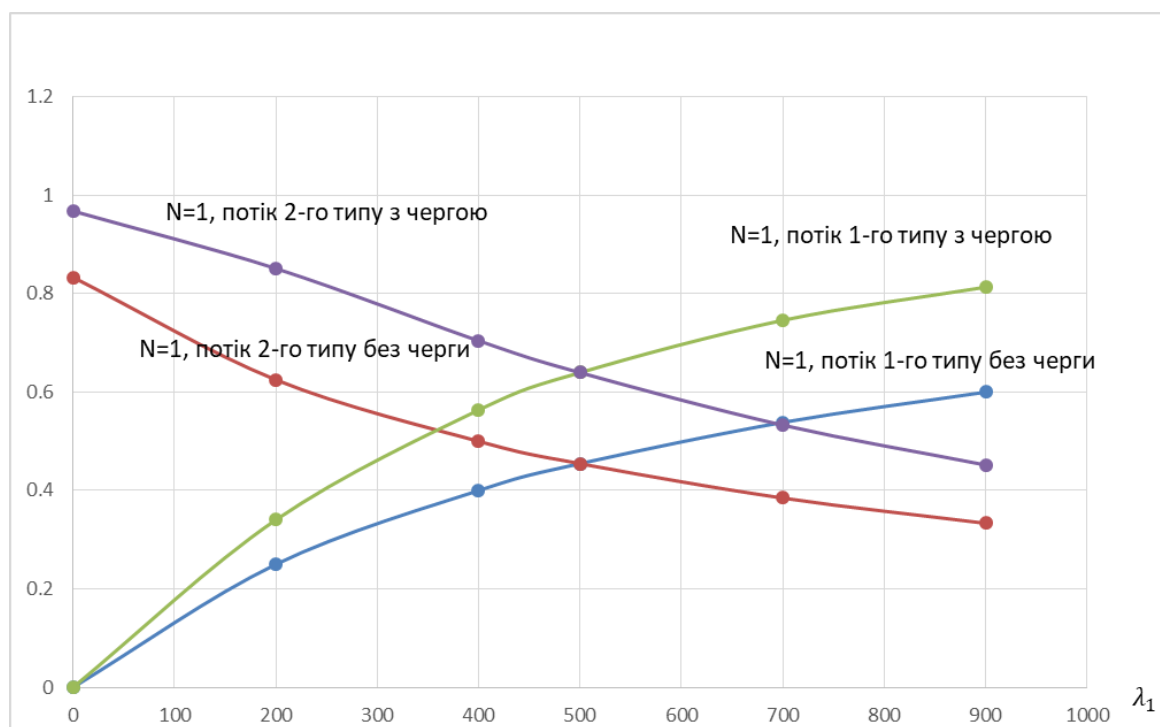


Рисунок 2.13 - Графік динаміки показників продуктивності СМО з  $N=1$  з місцями для черги та без в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

На рис. 2.13 завдяки наявності місць для черги спостерігається значний приріст продуктивності для заявок 1-го типу (20%), дещо менший для заявок другого типу – 12%. Збільшення числа обслуговуючих приладів є відносно більш дієвим методом покращення показників продуктивності, ніж введення черги, але слід брати до уваги всі показники Літла.

Ймовірність відмови є важливим показником як для провайдера телекомунікаційних послуг, так і для користувача[15]. На рис. 2.14 спостерігається суттєве зниження ймовірності відмови в обслуговуванні заявки при зростанні інтенсивності вхідного навантаження заявками 1-го типу. Зауважимо, що при збільшенні числа обслуговуючих приладів приріст ймовірності відмови був помітно меншим [2].

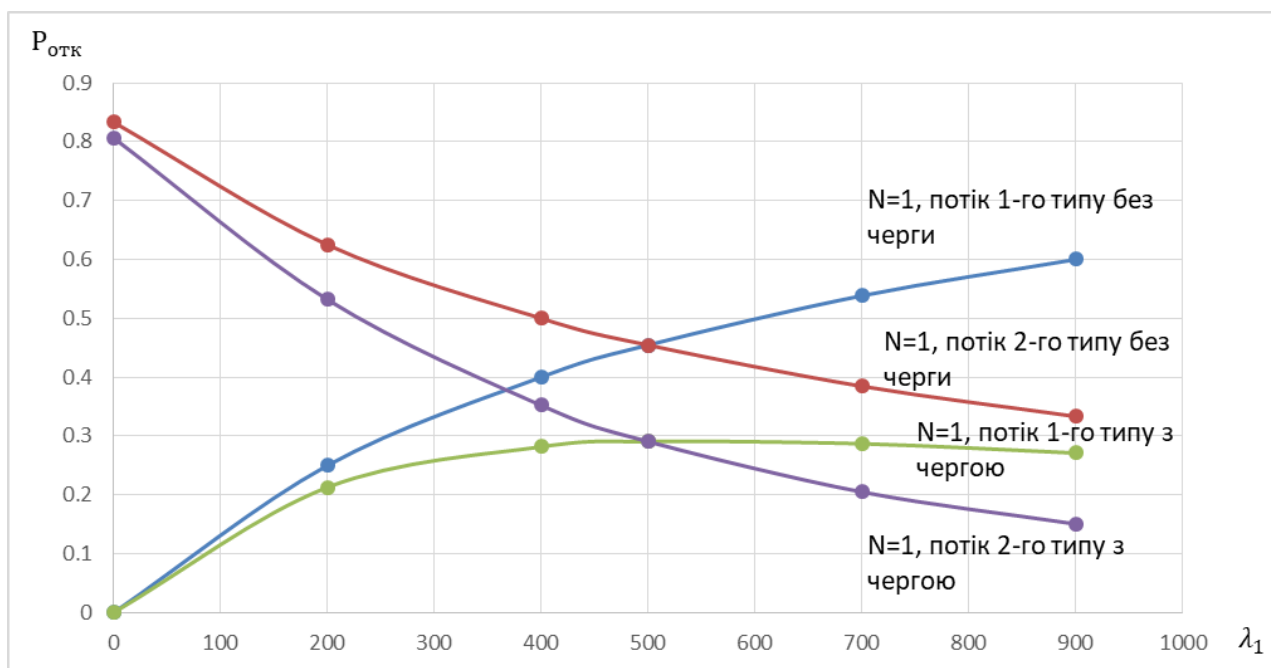


Рисунок 2.14 – Графік динаміки показників ймовірності відмови СМО з  $N=1$  з місцями для черги та без в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Згідно першої формули Літла ймовірність обслуговування має прямий зв'язок з показником ймовірності відмови  $P_{обсл}=1-P_{відм}$ . Але в СМО з одним ОП без черги виникає парадокс:  $P_{обсл}=P_{відм}$ , що і спостерігається на рис. 2.14, 2.15.

Натомість в СМО з двома приладами ймовірність відмови та ймовірність обслуговування в сумі складають 1. Загалом, внесення місць для черги до структури СМО покращило показники ймовірності обслуговування заявок обох потоків.

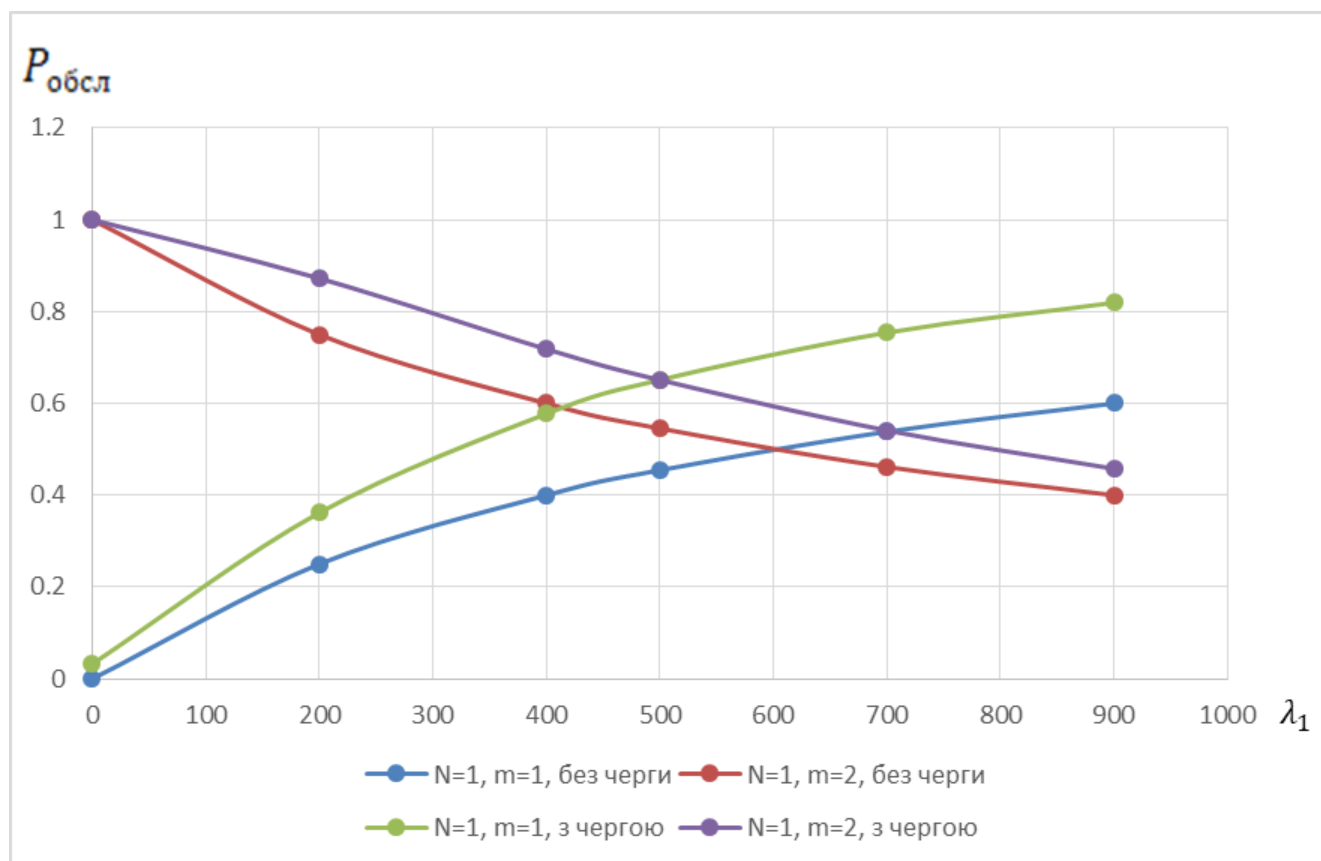


Рисунок 2.15 – Графік динаміки показників ймовірності обслуговування СМО в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

На рис. 2.16 представлена динаміка показника ймовірності простою для СМО з 1 обслуговуючим приладом з наявними місцем для черги та без черги. На графіку спостерігаємо, що завдяки наявності місць для черги ймовірність простою системи знизилася на 14 – 6,1%, що є позитивною зміною з точки зору провайдера телекомунікаційних послуг.



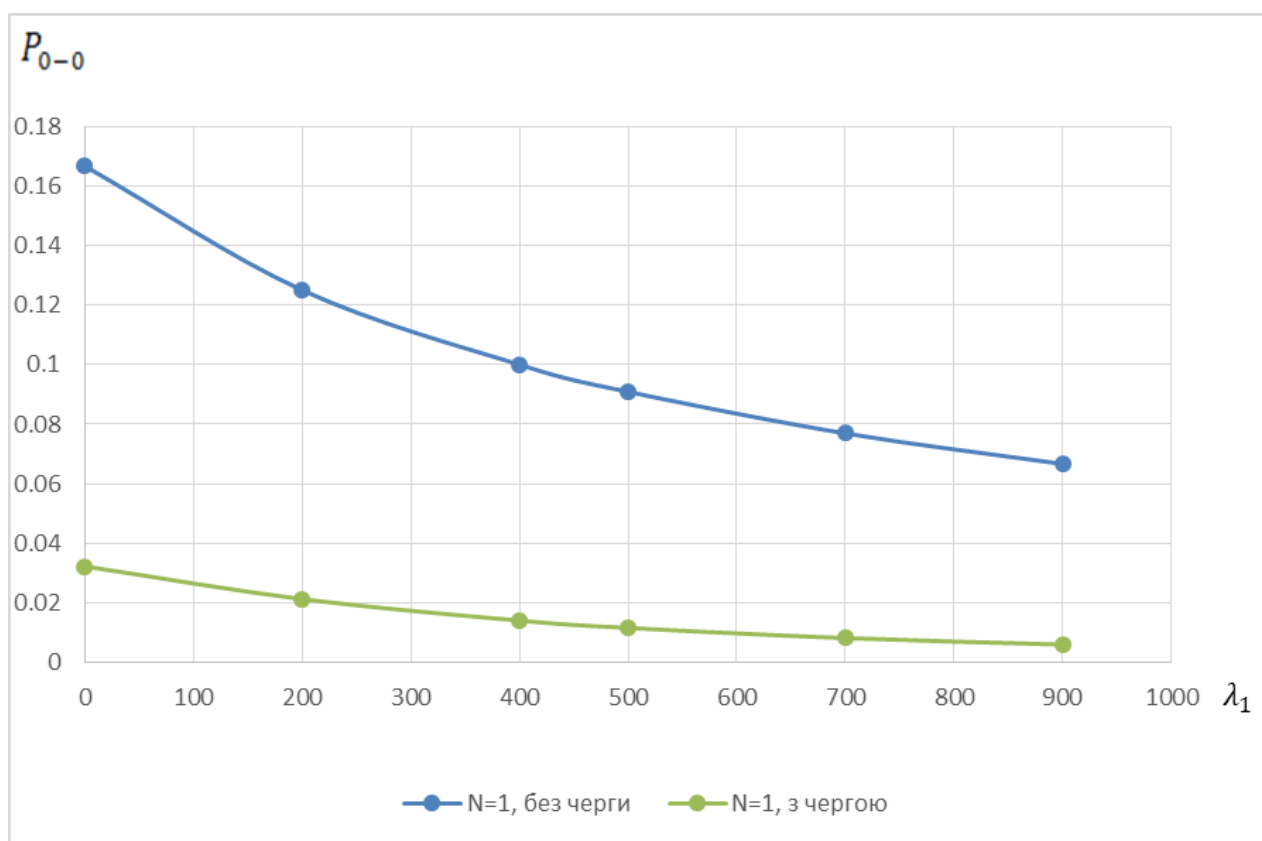


Рисунок 2.16 - Графік динаміки показників ймовірності простою СМО в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Динаміка показника ймовірності зайнятості системи обслуговуванням заявок  $P_{зан}$  має подібний характер до динаміки показника ймовірності обслуговування заявок. Для першого потоку заявок ( $m=1$ ) ймовірність  $P_{зан}$  зростає за рахунок збільшення інтенсивності надходження заявок 1-го потоку, а для заявок 2-го потоку ( $m=2$ )  $P_{зан}$  навпаки – зменшується, оскільки вхідне навантаження на другий потік є сталим.

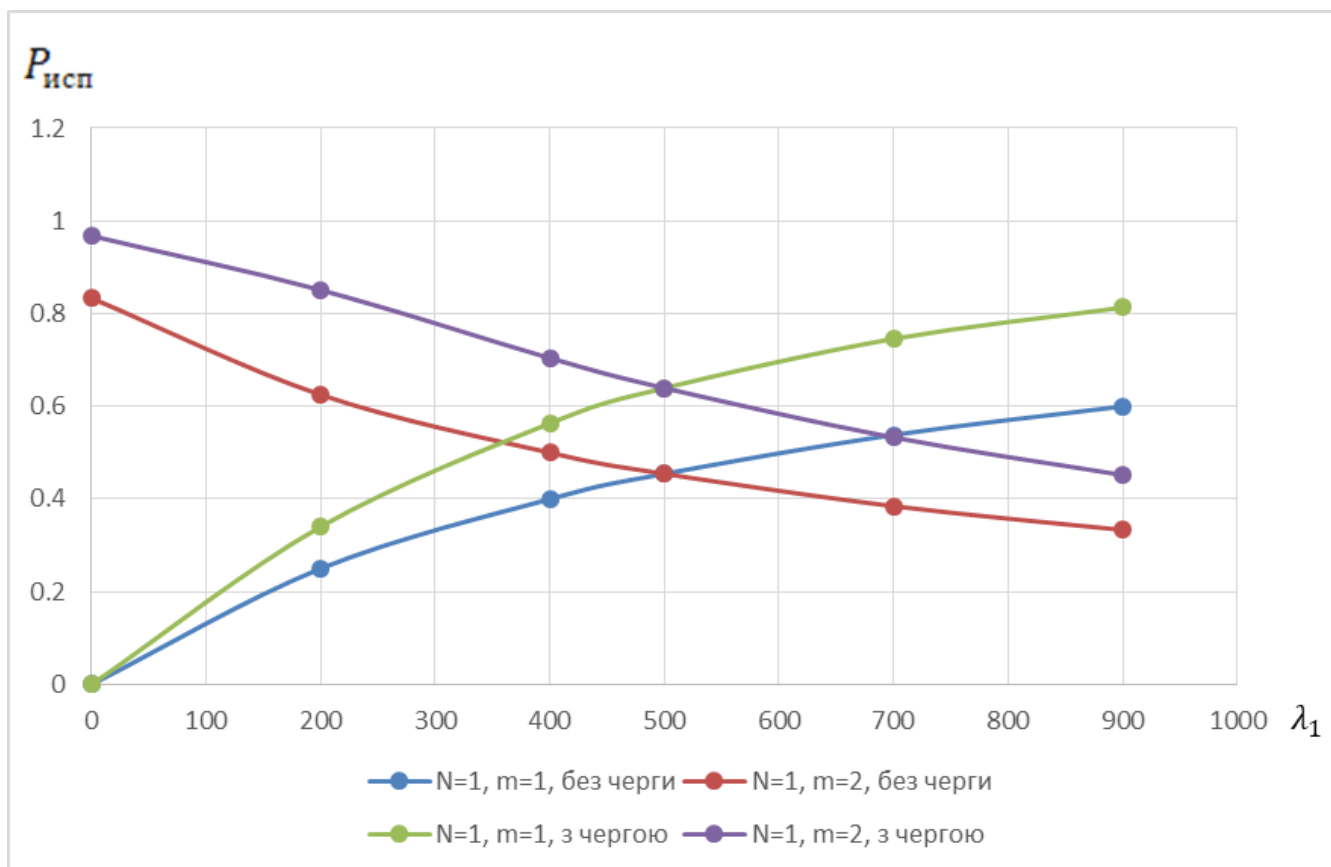


Рисунок 2.17 - Графік динаміки показника ймовірності зайнятості системи в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Розглянемо графік з показниками середнього числа заявок в системі  $Z_{\text{сист}}$ . На рис. 2.18 очевидно, що СМО з одним ОП та чергою вміщує найбільшу кількість заявок, ніж СМО без черги. Для другого потоку показник  $Z_{\text{сист}}$  незначно зменшується через стале вхідне навантаження заявками 2-го потоку, і через активне зростання вхідного навантаження заявками 1-го потоку. Зі зростанням параметра  $\lambda_1$  різниця між СМО з 1 ОП з чергою та СМО без черги при  $m=1$  дедалі більша. Це обумовлено шостим показником Літла:  $Z_{\text{сист}} = K_{\text{обсл}} + r_{\text{черги}}$ . Таким чином, варто розглянути динаміку показників обслуженого навантаження  $K_{\text{обсл}}$  та середнього числа заявок в черзі  $r_{\text{черги}}$ .

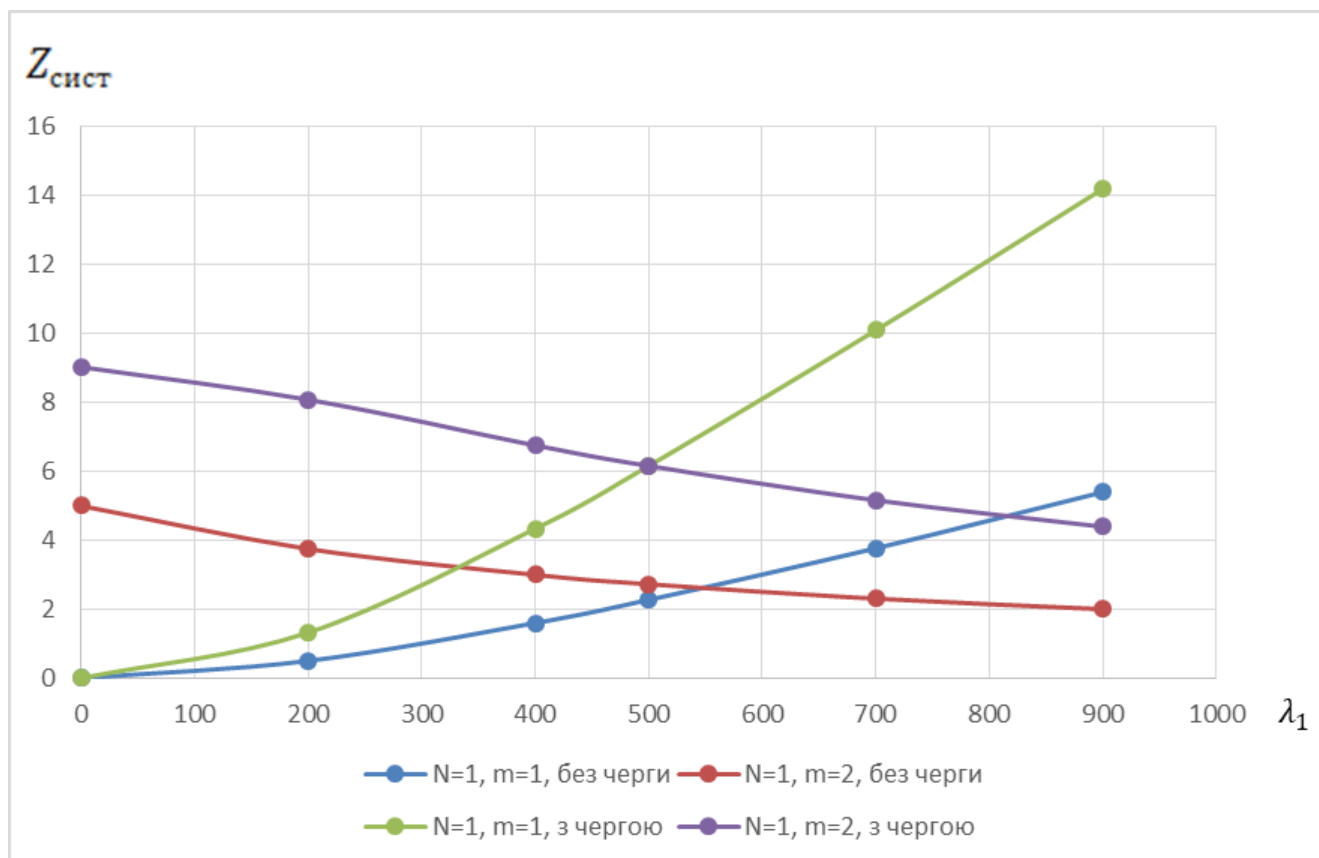


Рисунок 2.18 - Графік динаміки показника середнього числа заявок в системі в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

На рис. 2.19 наведена динаміка показника обслуженого навантаження  $K_{\text{обсл}}$ . Очевидно, що наявність місць для черги незначно покращила якість обслуговування як для заявок першого потоку, так і для заявок другого потоку. Проте, за рахунок введення до структури СМО місць для черги, значно зріс показник середнього числа заявок у черзі  $r_{\text{черги}}$ , що і дивно, оскільки безпріоритетна СМО з одним ОП та двома потоками не мала місць для черги взагалі, звідси  $r_{\text{черги}} = 0$ . Безумовно, введення черги призвело до значного підвищення середнього числа заявок у системі  $Z_{\text{сист}}$ , що також є перевагою для постачальника телекомунікаційних послуг.

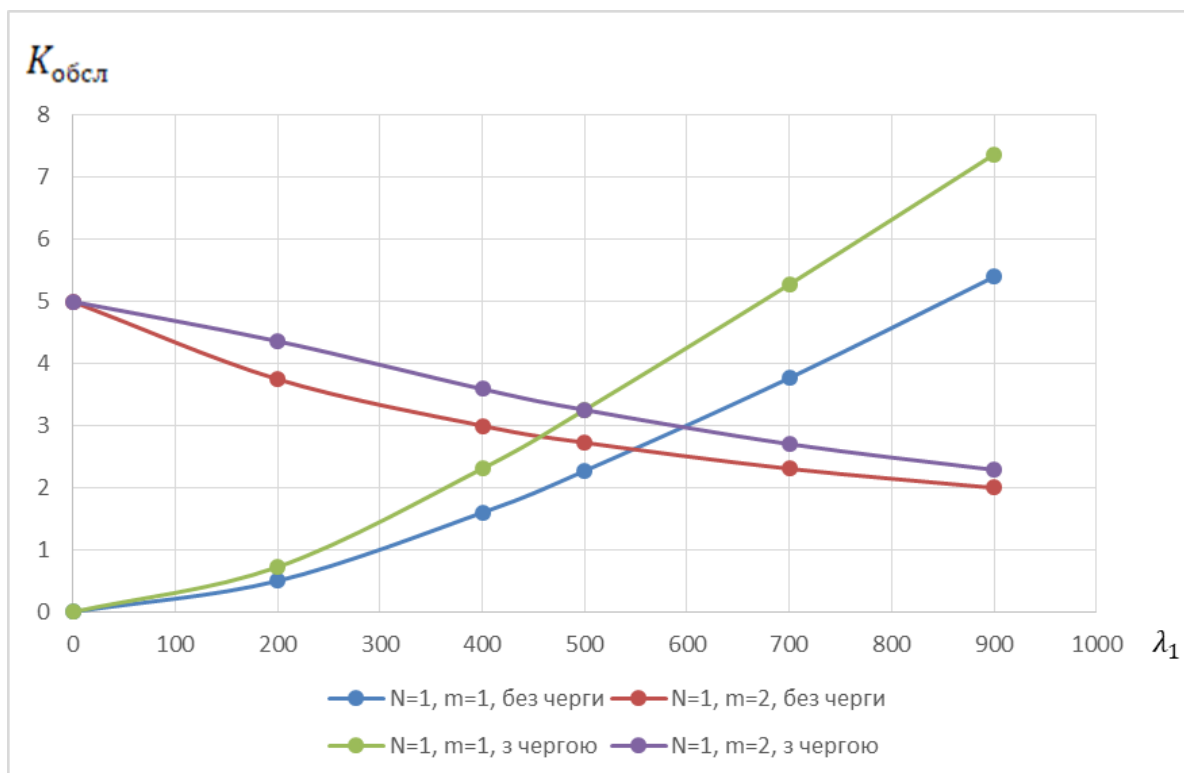


Рисунок 2.19 - Графік динаміки показника обслуженого навантаження в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

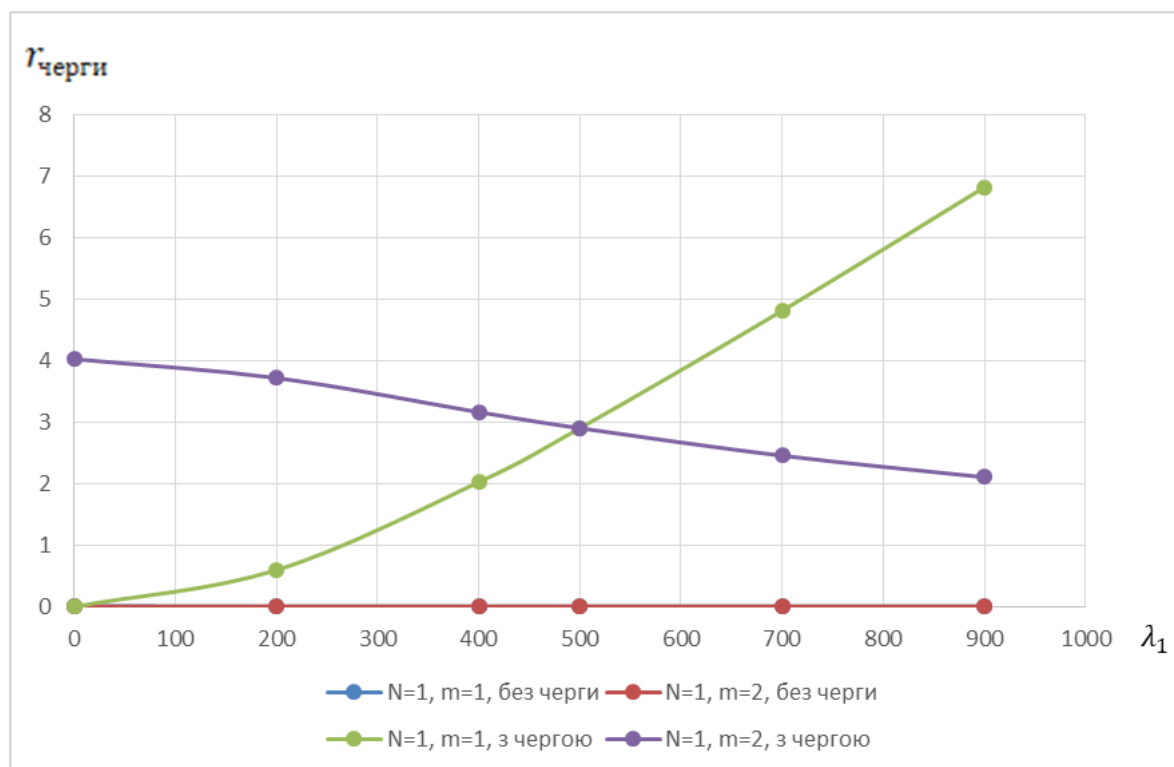


Рисунок 2.20 - Графік динаміки показника середнього числа заявок в системі в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Разом з покращеннями, набутих при введенні місць для черги, виникає важлива для користувача проблема: різке зростання середнього часу очікування на обслуговування заявки. В моделях СМО без черги заявки або обслуговувалися, або втрачалися. Черга стала інструментом для зменшення числа втрачених заявок, за що довелося «заплатити» часом, який витрачає користувач на очікування.

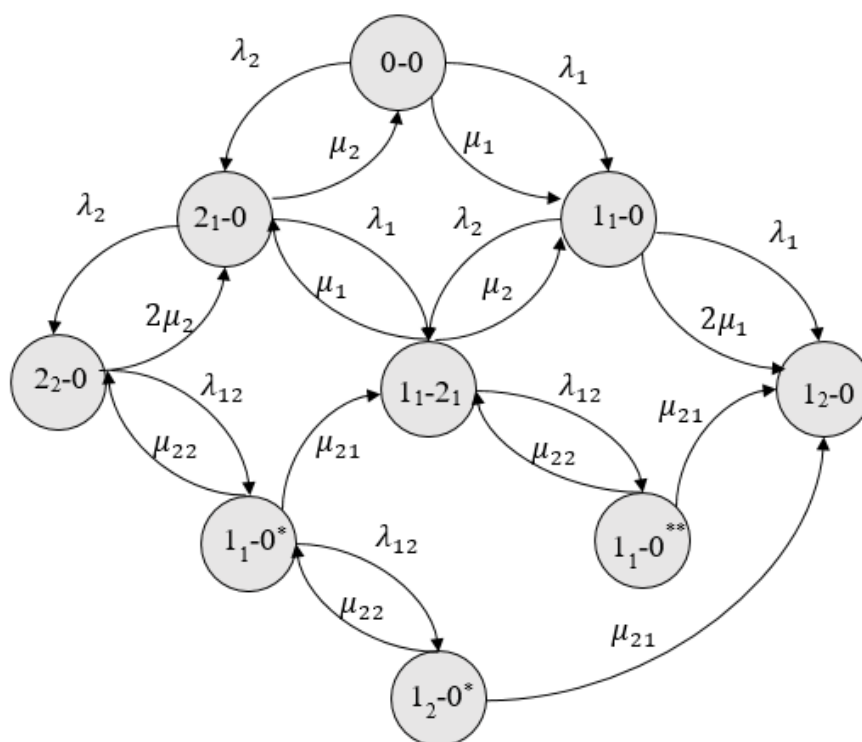


Рисунок 2.21 - Уніфікована СМО з двома потоками та двома приладами обслуговування [12]

Розглянемо, як змінюються показники Літтла внаслідок додавання місць для черги. Для цього порівняємо СМО з одним ОП та чергою (рис. 2.12), модель з двома ОП без черги (рис. 2.4) та модель СМО з рис. 2.21. Суцільними лініями позначено показники якості обслуговування першого потоку заявок, штриховими лініями – характеристики заявок другого потоку.

Величина  $P_{\text{обсл1}}$  – ймовірність обслуговування заявок першого потоку. На рис. 2.22 спостерігаємо очікувані результати: найбільші значення  $P_{\text{обсл1}}$  має СМО з двома обслуговуючими приладами та чергою. На другому місці СМО з двома приладами без місць для черги і найменшу ймовірність обслуговування заявок

першого потоку гарантує СМО з одним ОП та наявними місцями для черги. З рис. 2.22 випливає, що введення місць для черги значно підвищила ймовірність обслуговування заявок, що є позитивною зміною як для користувача, так і для провайдера телекомунікаційних послуг.

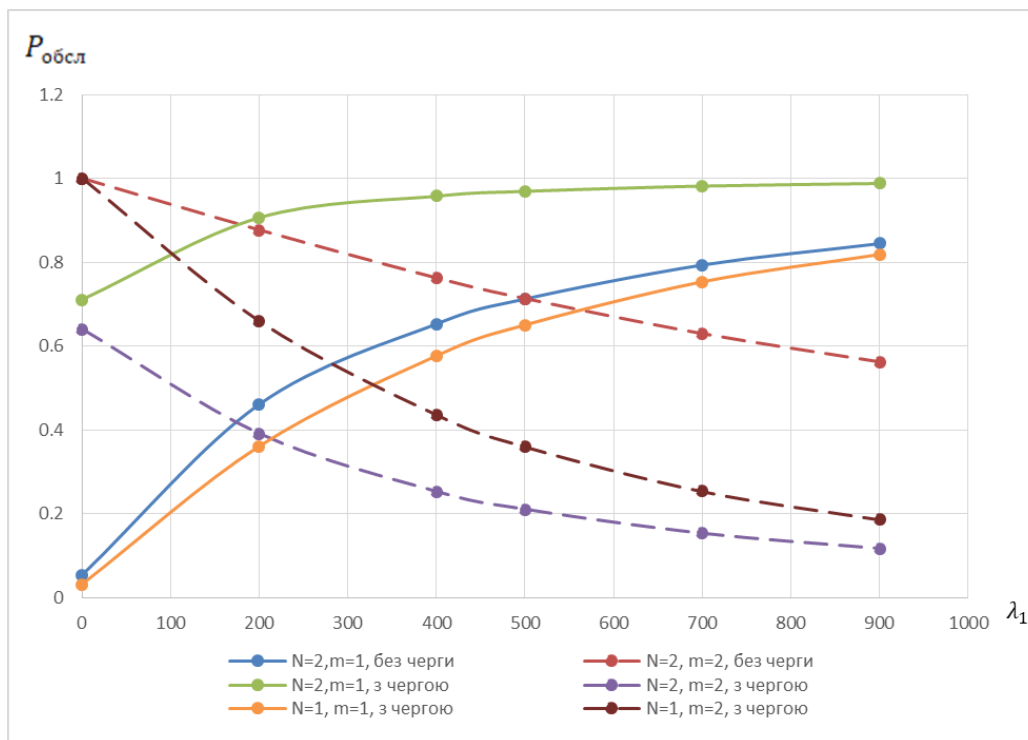


Рисунок 2.22 - Графік динаміки значень ймовірності обслуговування заявок 1-го і 2-го потоків в залежності від інтенсивності надходження заявок 1-го типу

На рис. 2.23 спостерігається динаміка значень ймовірності відмови в обслуговуванні заявок 1-го і 2-го потоків в залежності від інтенсивності надходження заявок 1-го типу. Найменшу ймовірність відмови в обслуговуванні заявок першого потоку гарантує безпріоритетна СМО без черги. При невеликих значеннях параметра інтенсивності надходження заявок 1-го типу ( $\lambda_1 < 270$ ) СМО з двома ОП та чергою має вищі показники  $P_{\text{відм}}$ , ніж безпріоритетна СМО з одним ОП та чергою. Така обставина пояснюється наявністю пріоритетного обслуговування в моделі з двома обслуговуючими приладами та чергою. Проте при великих вхідних навантаженнях пріоритетна система гарантує менші втрати. Таким чином, маємо точку перегину, або точку управління пріоритетами, що

підводить інженера телекомунікаційних систем до застосування ситуаційного управління. Суть ситуаційного управління полягає у виборі найбільш ефективної з точки зору показників QoS дисципліни обслуговування. Ймовірності відмови заявкам другого потоку вищі, ніж для заявок першого потоку, що є цілком природньо, оскільки розглядається залежність  $P_{\text{відм}}$  від  $\lambda_1$ . Найбільшу ймовірність відмови заявкам другого потоку гарантує пріоритетна СМО з двома приладами, а найменшу – безпріоритетна СМО з двома ОП.

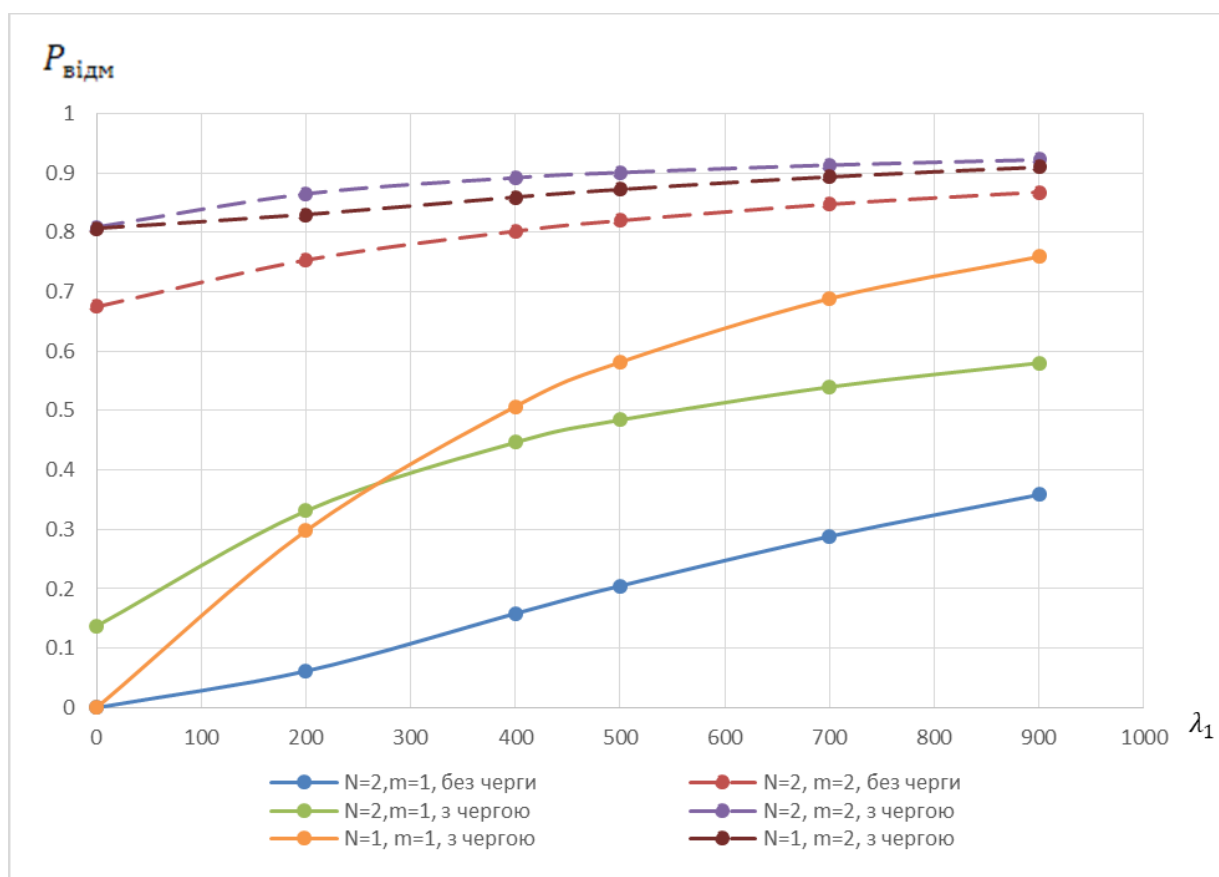


Рисунок 2.23 - Графік показників ймовірності відмови для заявок 1-го і 2-го потоків в залежності від інтенсивності надходження заявок 1-го типу

На рис. 2.24 наведений графік динаміки значень ймовірності зайнятості системи в залежності від інтенсивності надходження заявок 1-го типу. Найбільш «зайнятою» є система з двома обслуговуючими приладами та місцями для черги, трохи нижчі показники у системи з одним обслуговуючим приладом та чергою. СМО з одним ОП та відсутніми місцями для черги має найнижчі показники

зайнятості, більше того, ймовірність того, що дана система буде простоювати значно вища, ніж у інших СМО, що розглядаються. Показник  $P_{\text{зан}}$  безпосередньо пов'язаний з ймовірністю простою через 3-й показник Літтла.

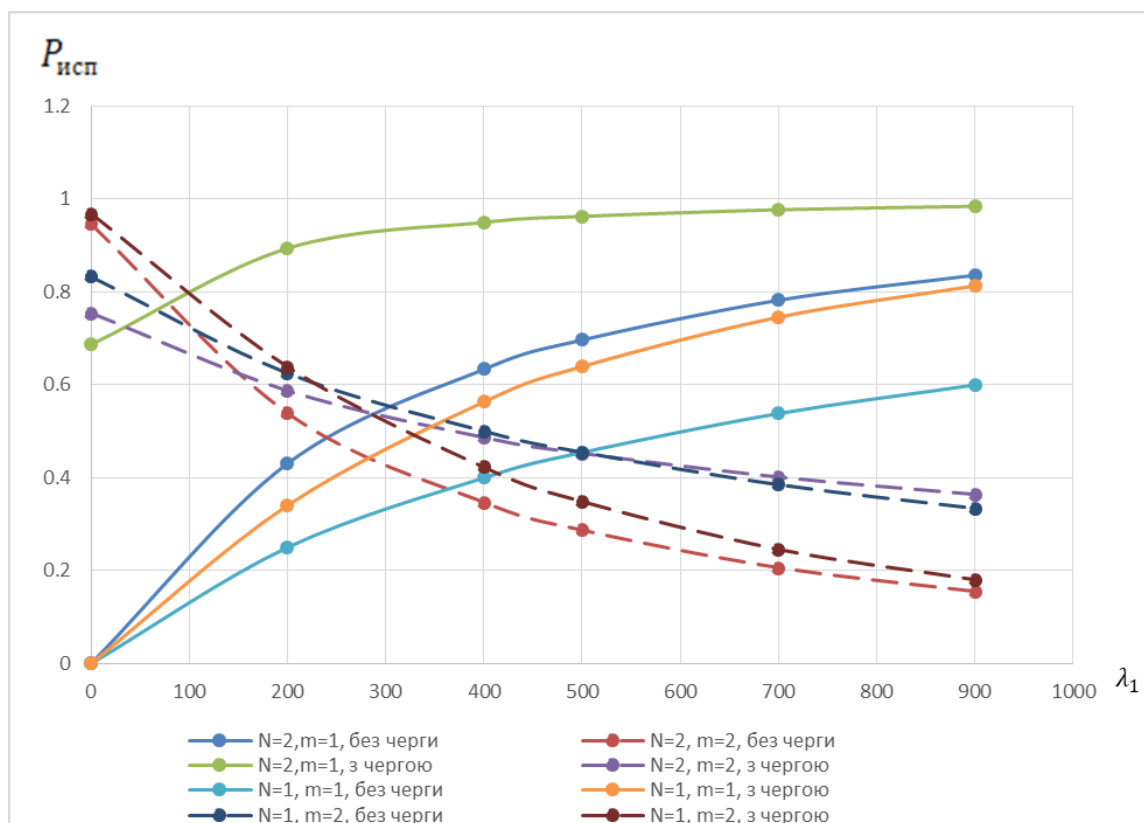


Рисунок 2.24 - Графік динаміки значень ймовірності зайнятості системи в залежності від інтенсивності надходження заявок 1-го потоків

На рис. 2.24 графіки  $P_{\text{зан}}$  для заявок другого потоку спостерігаються точки перетину, природу яких варто висвітлити. Перша точка перетину виникла при  $\lambda_1=100$ . В цій точці задіяно СМО з двома та одним ОП, без черги, причому якщо  $\lambda_1>100$ , СМО з одним ОП має вищі показники  $P_{\text{зан}}$ , що спричинено повною незалежністю обох потоків заявок, на відміну від СМО з двома потоками.

Наступна точка перетину виникла при  $\lambda_1=150$ , перетинаються СМО з двома ОП, з чергою та без черги. Перевага СМО з чергою полягає у тому, що в наявності є додаткові стани, де заявка другого типу може дочекатися на своє обслуговування, а отже, зменшити ймовірність відмови в обслуговуванні.



При  $\lambda_1=200$  спостерігається ще одна точка перетину. В даному випадку, розглядаються СМО з одним ОП з чергою та без. Зі збільшенням інтенсивності надходження заявок першого потоку, ймовірність зайнятості заявками другого потоку СМО з чергою нижча, оскільки між двома потоками є «з'єднуючий стан», що «надає» ресурси менш активного потоку більш активному.

Наступна точка перегину виникла при  $\lambda_1=270$ , перетинаються графіки для СМО з  $N=2$ , з чергою та СМО з  $N=1$  також з чергою. З одного боку дивно, що СМО з більшим числом приладів має нижчі показники  $P_{зан}$ , але дана СМО має набагато більших «з'єднуючих станів», які забирають шанси на обслуговування у менш активного потоку. Оскільки графіки побудовані залежно від зростання інтенсивності надходження заявок першого типу ( $\lambda_1$ ), то більші втрати несе, без сумніву, другий потік заявок.

На рис. 2.25, 2.26 зображена динаміка середнього числа заявок першого типу залежно від зростання інтенсивності вхідного навантаження  $\lambda_1$ . Очевидно, СМО з чергою здатні прийняти і обслуговувати більшу кількість заявок, ніж системи без місць для черги.

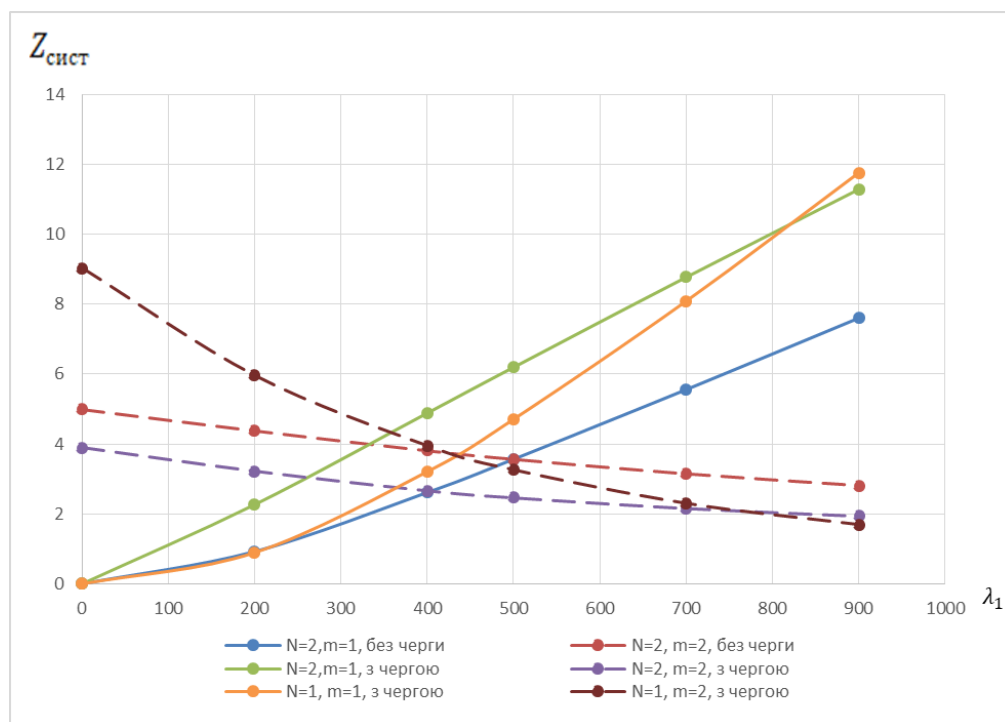


Рисунок 2.25 - Графік динаміки середнього числа заявок першого типу в системі в залежності від інтенсивності вхідного потоку заявок 1-го типу

На рис. 2.25 знову спостерігаються перетини ліній графіків показників середнього числа заявок другого типу ( $Z_{\text{сист}}$ ). При невеликих вхідних навантаженнях заявками першого потоку СМО з одним ОП та чергою є найкращою для заявок другого потоку. Проте при  $\lambda_1=400$  дана СМО втрачає позиції в порівнянні зі СМО з двома ОП з чергою та без. Це пов'язано з тим, що наявність додаткових ОП забезпечує обслуговування заявки, що надійшла, в той час як додаткове місце для черги лише затримує заявку в режимі очікування.

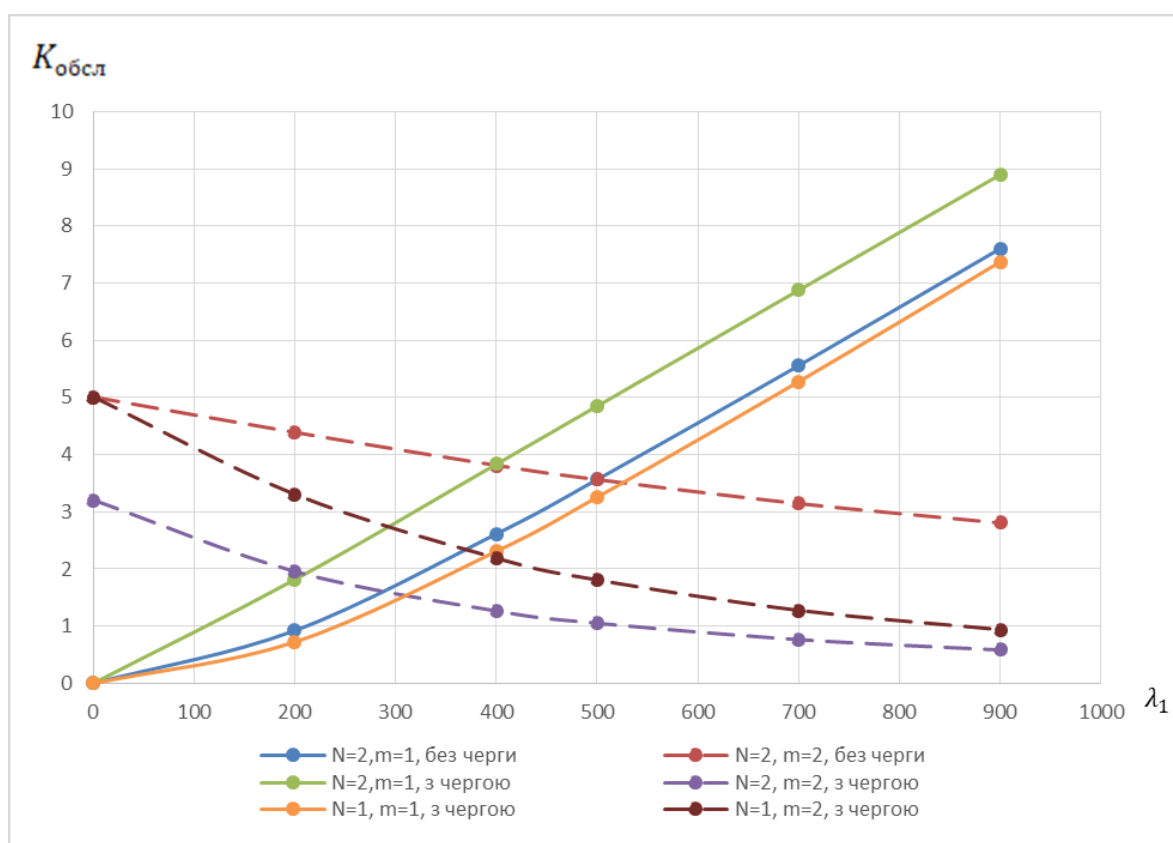


Рисунок 2.26 - Графік динаміки обслуженого навантаження системою в залежності від інтенсивності вхідного потоку заявок 1-го типу

Оберненою величиною до показника середнього числа заявок в системі є показник середнього часу перебування заявки в системі  $\tau_{\text{сист}}$ . Зі зростанням вхідного навантаження  $\tau_{\text{сист}}$  очікувано знижується, оскільки чим більше заявок, тим менше часу доводиться відводити на їх обслуговування. Також, важливу роль відіграє ймовірність відмов в обслуговуванні, адже у разі відмови в обслуговуванні для такої заявки  $\tau_{\text{сист}}=0$ . На рис. 2.27 спостерігаємо, що найбільше

часу на обслуговування мають заявки моделі з двома ОП та місцями для черги, на другому місці СМО з 1 приладом та чергою. Моделі без черги надають найменше часу на обслуговування.

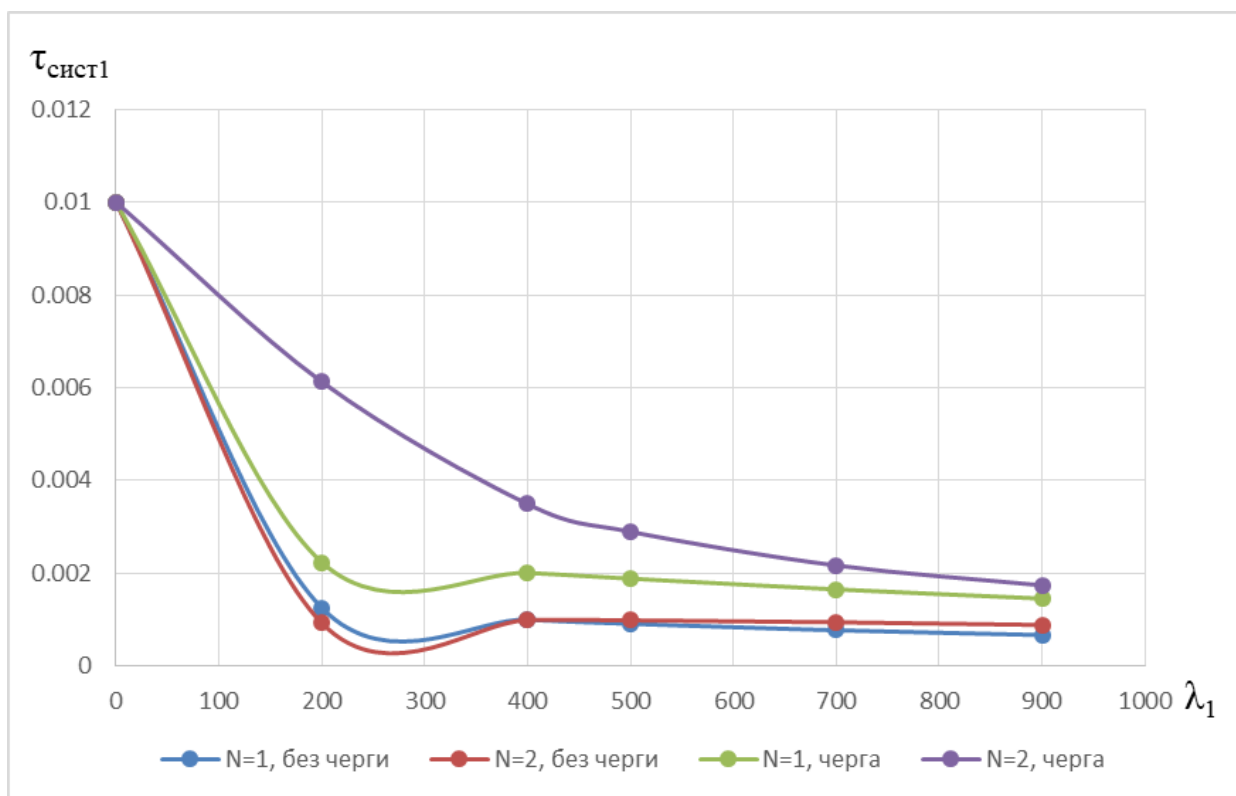


Рисунок 2.27 - графік динаміки показника середнього часу перебування заявок 1-го потоку в системі в залежності від інтенсивності вхідного навантаження заявок першого типу

На рис. 2.28 наведено графік динаміки показника середньої тривалості обслуговування заявок 2-го типу. В даному випадку найбільше часу на обслуговування надається моделлю з одним обслуговуючим приладом та чергою, а найменше часу надає модель з двома приладами та чергою.

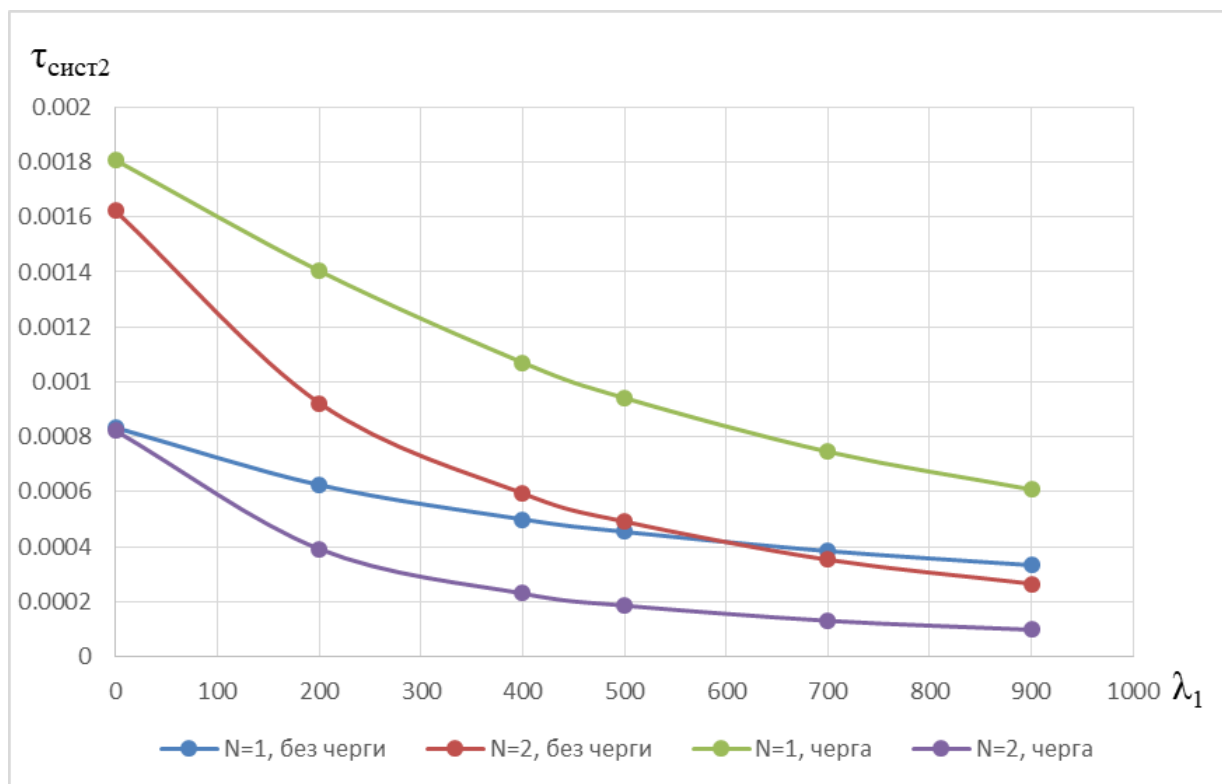


Рисунок 2.28 - Графік динаміки показника середнього часу перебування заявок 2-го потоку в системі в залежності від інтенсивності вхідного навантаження заявок першого типу

На рис. 2.29 показано динаміку показника середньої тривалості обслуговування заявки  $\tau_{обсл}$ . Очевидно, найбільше часу на обслуговування надає модель з двома обслуговуючими приладами та чергою, за рахунок більшого числа приладів обслуговування. На другому місці СМО без черги, при чому модель з двома обслуговуючими приладами має дещо більший показник  $\tau_{обсл}$ , ніж модель з єдиним ОП. Найменше часу на обслуговування виділяє модель з 1 ОП та чергою, оскільки заявки обслуговуються лише одним ОП, при чому заявка може витратити час на очікування в черзі.

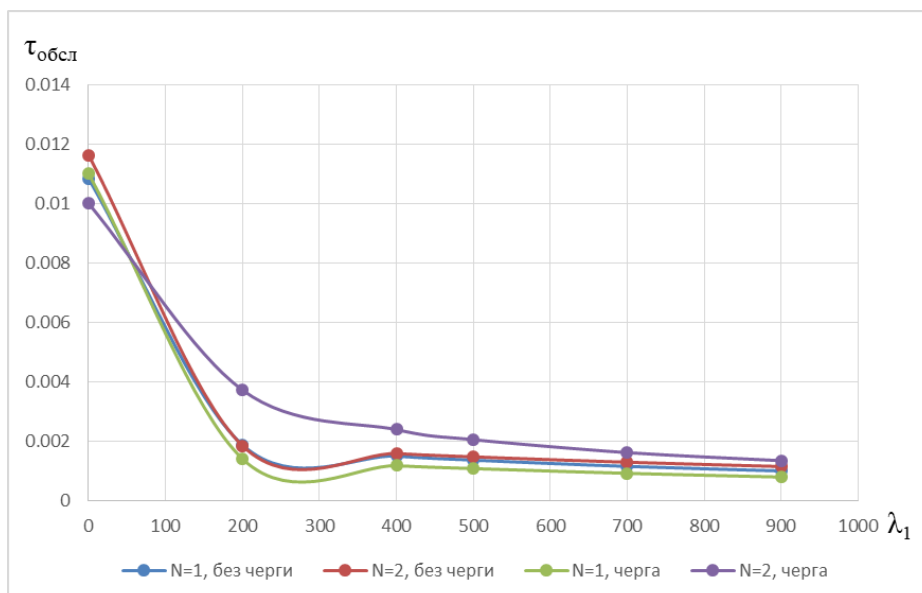


Рисунок 2.29 - Графік динаміки показника середнього часу обслуговування заявок в залежності від інтенсивності вхідного навантаження заявок 1-го типу

На рис. 2.30 спостерігаємо динаміку показника середньої тривалості очікування заявки в черзі. В даному випадку розглядаємо графіки лише для моделей з чергою. Очевидно, модель з двома ОП має більше місць для черги, і тому показник  $\tau_{\text{черги}}$  вищий. Проте, при вхідному навантаженні  $\lambda_1=400$  знову спостерігається точка перегину.

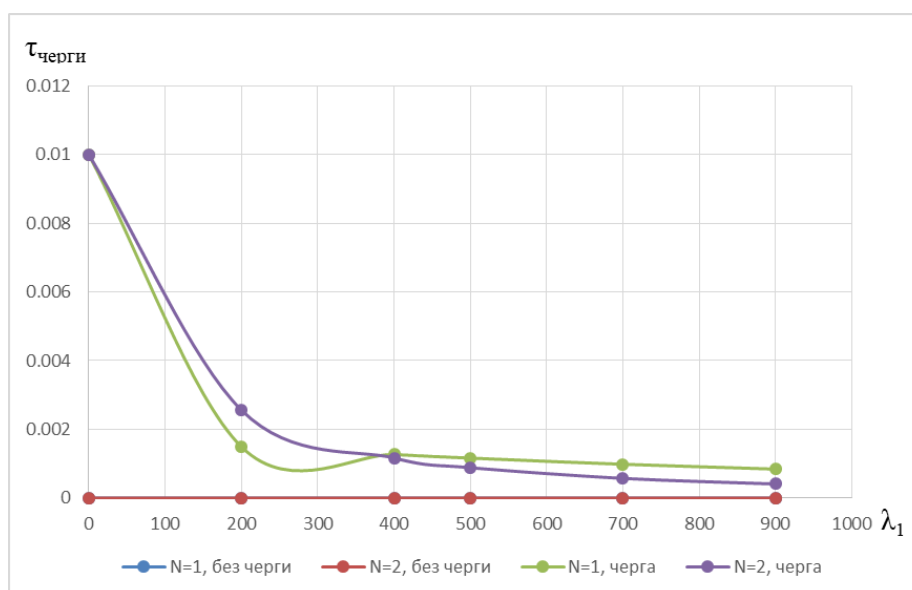


Рисунок 2.30 - Графік динаміки показника середнього часу перебування заявки в черзі в залежності від інтенсивності вхідного навантаження заявок 1-го типу

Таким чином, введення місць для черги в структуру СМО впливає на показники QoS наступним чином:

- Отриманий значний приріст продуктивності (20%) для першого потоку, 12% - для другого;
- Ймовірність обслуговування значно зросла, особливо для СМО з більшою кількістю ОП, а ймовірність відмови для СМО з  $N=2$  та чергою є найнижчою серед розглянутих моделей;
- Ймовірність зайнятості системи незначно зростає;
- Середня кількість заявок в системі значно збільшується у порівнянні з моделями без черги, при цьому точки перегину не спостерігаються;
- Часові параметри є оберненими до показників середнього числа заявок, обслуженого навантаження і середнього числа заявок в черзі. Показано, що наявність черги поліпшує наведені показники.

### 2.3 Кількісний аналіз впливу на показники якості обслуговування вибору дисципліни обслуговування

Дисципліна обслуговування формально описує процедуру обслуговування (порядок заняття приладу, очікування, переривання обслуговування). В момент переповнення місць для черги вибір, доцільної для поточного стану СМО, дисципліни обслуговування стає панацеєю, яка забезпечує обслуговування пріоритетних заявок і, за можливістю, заявок нижчого пріоритету[8].

Проте, варто розуміти, що при скачках інтенсивності вхідного навантаження, потрібно переходити від однієї дисципліни обслуговування до іншої, залежно від того, яка із запропонованих є найбільш оптимальною в поточному стані СМО. Для цього інженерові телекомунікаційних систем необхідно оволодіти прийомами ситуаційного керування[4].

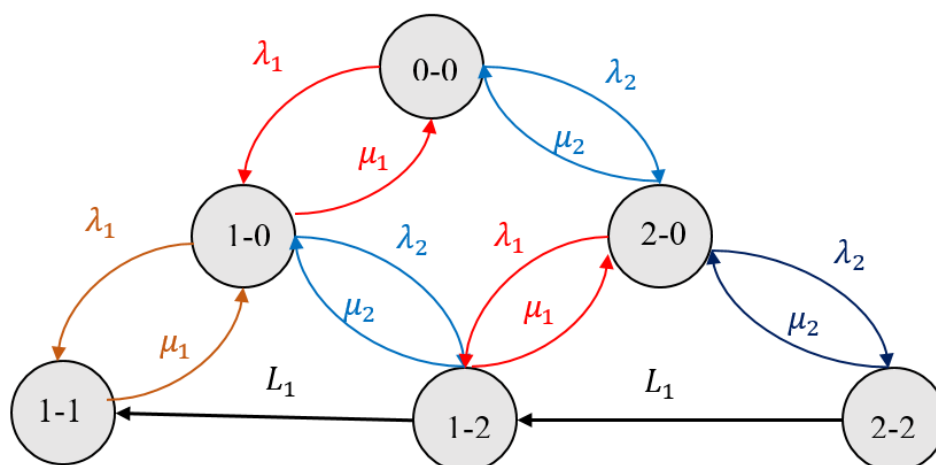


Рисунок 2.31 - Граф станів СМО з одним обслуговуючим приладом, двома потоками, чергою та пріоритетним обслуговуванням

У систем масового обслуговування без пріоритетів ймовірність обслуговування заявки будь-якого потоку співпадає з ймовірністю того, що в момент надходження заявки прилад буде вільний, так як це у даній СМО є єдиною умовою обслуговування заявки [9].

Безпріоритетні системи з економічних міркувань не доцільно використовувати, оскільки під час надходження заявки в момент відсутності вільних обслуговуючих пристроїв, заявка втрачається, бо їй відмовляють в обслуговуванні. Основною кількісною оцінкою якості обслуговування при цьому є ймовірність втрати вимоги [10].

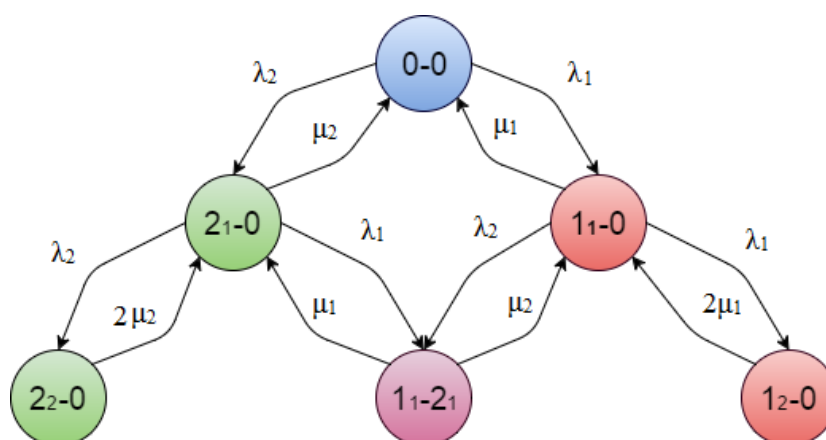


Рисунок 2.32 СМО з двома потоками та двома приладами обслуговування (без пріоритетів)

Суть відносного пріоритету (head of the line priority discipline) полягає в тому, що вимога вищого пріоритету стає на початок черги без переривання [15].

Заявки першого виду з інтенсивністю надходження  $\lambda_1$  та параметром експоненціального обслуговування  $\mu_1$  прийняті як пріоритетні, а заявки другого виду з параметрами  $\lambda_2, \mu_2$  – непріоритетні. Для заявок першого виду, які надходять на прилад, діють такі правила:

- якщо прилад вільний, заявка приймається до обслуговування та обслуговується до кінця;
- якщо прилад зайнятий обслуговуванням іншої заявки другого виду, а місце в черзі вільне, то заявка займає місце в черзі і очікує надходження на обслуговування, після чого обов'язково обслуговується;
- якщо прилад зайнятий обслуговуванням заявки першого виду або зайняті місця в черзі, то заявка, яка надходить втрачається.

Заявка другого виду, яка надійшла на зайнятий прилад, втрачається. Заявка, яка надійшла на вільний прилад, обслуговується до кінця тільки в тому випадку, коли не буде перервана заявкою першого виду, тобто пріоритетною.

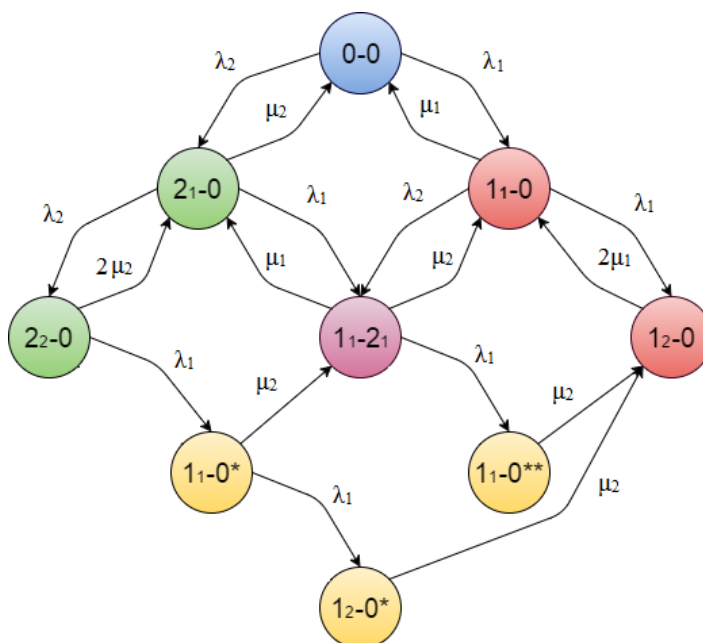


Рисунок 2.33 – СМО з двома потоками та двома приладами обслуговування (відносний пріоритет)



Суть абсолютного пріоритету з перериванням (pre-emptive discipline) полягає у тому, що вимога вищого пріоритету перериває обслуговування вимоги нижчого пріоритету [10].

Заявки першого виду з інтенсивністю надходження  $\lambda_1$  та параметром експоненціального обслуговування  $\mu_1$  прийняті як пріоритетні, а заявки другого виду з параметрами  $\lambda_2, \mu_2$  – непріоритетні. Для заявок першого виду, які надходять на прилад, діють такі правила:

- якщо прилад вільний, заявка приймається до обслуговування та обслуговується до кінця;
- якщо прилад зайнятий обслуговуванням іншої заявки другого виду, то переривання здійснюється негайно, тобто  $\Delta t_0 = 0$ .
- якщо прилад зайнятий обслуговуванням заявки першого виду, то заявка, яка надходить втрачається.

Заявка другого виду, яка надійшла на зайнятий прилад, втрачається. Заявка, яка надійшла на вільний прилад, обслуговується до кінця тільки в тому випадку, коли не буде перервана заявкою першого виду, тобто пріоритетною.

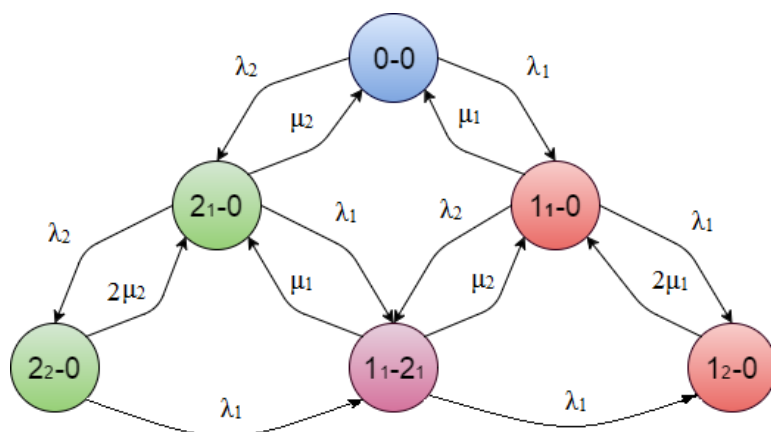


Рисунок 2.34 – СМО з двома потоками та двома приладами обслуговування (абсолютний пріоритет)

1. При  $\lambda_{12} = 0, \mu_{21} = 0, \mu_{22} = 0$  отримаємо систему без пріоритету.
2. Система з відносним пріоритетом повинна задовольняти таким умовам:  $\lambda_{12} = \lambda_1, \mu_{21} = \mu_2, \mu_{22} = 0$ .

### 3. Система з абсолютним пріоритетом: $\lambda_{12} = \lambda_1$ , $\mu_{21} = \infty$ , $\mu_{22} = 0$ [12].

Розглянемо вплив вибору дисципліни обслуговування на показники якості обслуговування заявок.

Спершу розглянемо показник ймовірності відмови  $P_{\text{відм}}$  для заявок першого потоку. З рис. 2.35 очевидно, що найбільше втрат отримають заявки у безпріоритетних моделях, при чому чим більше число обслуговуючих приладів, тим нижча ймовірність відмови. При невеликих значеннях вхідної інтенсивності  $\lambda_1 < 200$  пріоритетні моделі з одним обслуговуючим приладом є більш відмовостійкими, проте зі збільшенням вхідного навантаження пріоритетні СМО з двома ОП забезпечують нижчу ймовірність відмови у порівнянні з іншими моделями. Стосовно заявок другого типу (див. рис. 3.36), варто відзначити суттєво вищі втрати, ніж для заявок 1-го типу, при чому найбільш відмовостійкою є безпріоритетна модель з двома ОП, а найбільш жорсткою – модель з абсолютним пріоритетом.

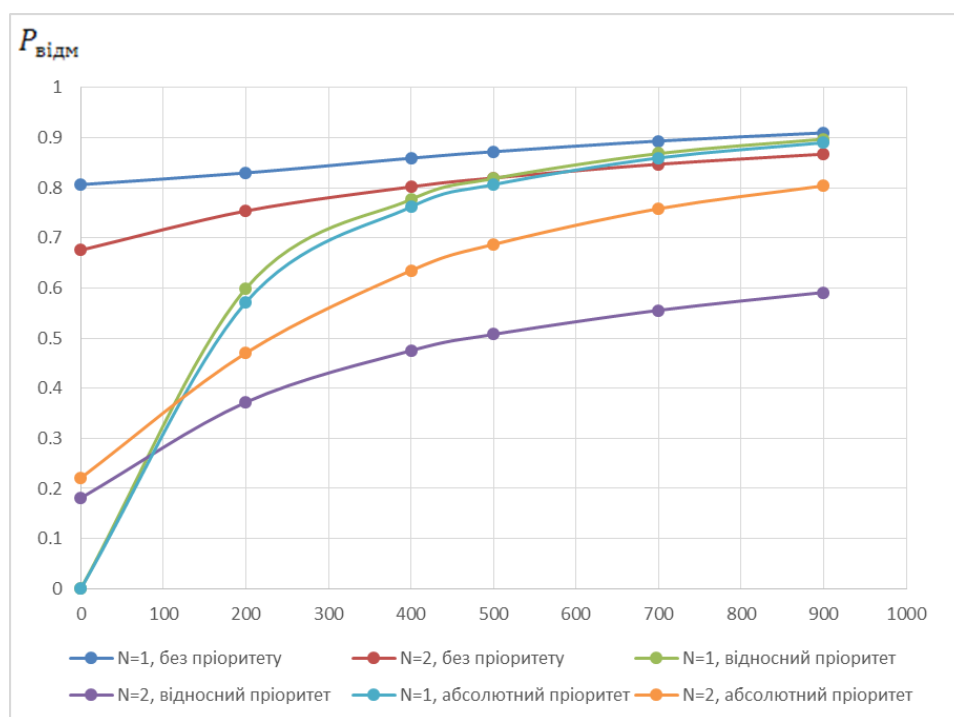


Рисунок 2.35 - Графік динаміки показників ймовірності відмов в обслуговуванні заявок першого потоку в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

На рис. 2.35 спостерігаються точки перетину між дисциплінами обслуговування, зокрема спостерігається різке зростання показників ймовірності відмови для СМО з одним ОП при абсолютному та відносному пріоритетах, що безумовно є поганою ознакою. Проте, при невеликих вхідних навантаженнях  $\lambda_1 < 125$  пріоритетні СМО з одним приладом мають найнижчі показники втрат у порівнянні з іншими моделями.

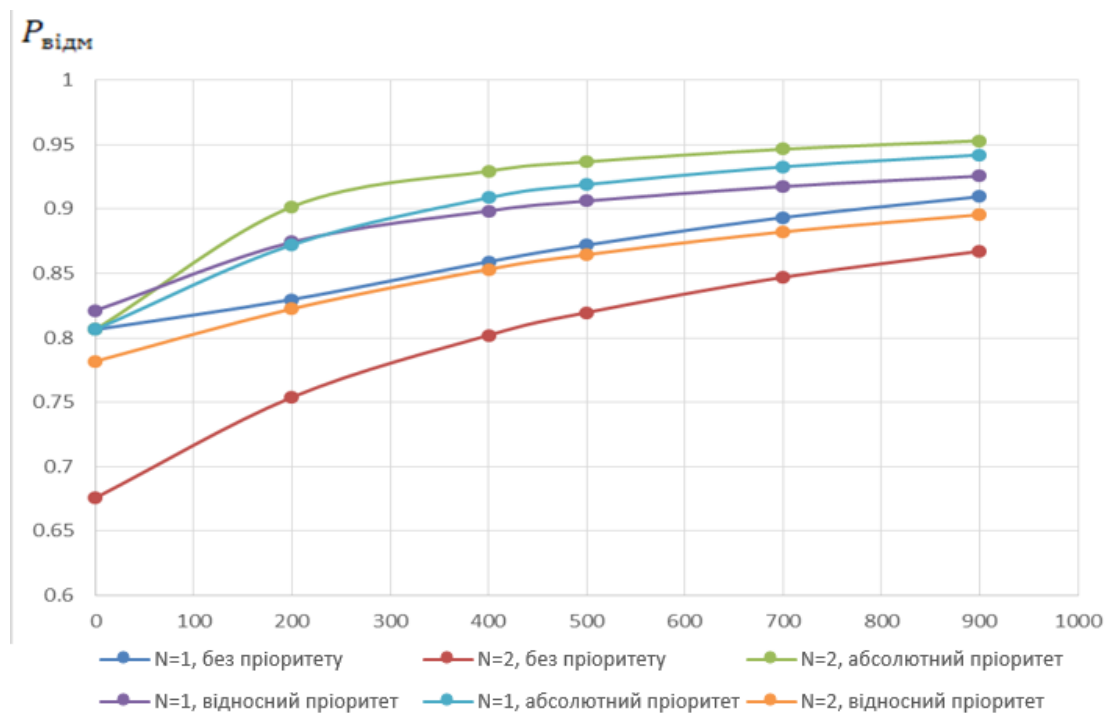


Рисунок 2.36 - Графік динаміки показників ймовірності відмов в обслуговуванні заявкам другого потоку в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Показник ймовірності обслуговування  $P_{\text{обсл}}$  тісно пов'язаний з ймовірністю втрат: чим більша ймовірність втрат, тим нижчу ймовірність обслуговування може гарантувати СМО. На рис. 2.37 показана динаміка ймовірності обслуговування заявок першого типу в залежності від параметра  $\lambda_1$ . Очікувано, безпріоритетна СМО з одним ОП гарантує найнижчу ймовірність в обслуговуванні в порівнянні з іншими моделями. Збільшення числа обслуговуючих приладів значно підвищила ймовірність обслуговування. При

невеликих навантаженнях СМО з відносним пріоритетом покращили показник  $P_{\text{обсл}}$  у порівнянні з безпріоритетною СМО з двома ОП, при чому при  $\lambda_1=400$  спостерігається точка перетину, після якої безпріоритетна СМО виграє у моделей з відносним пріоритетом максимум на 12%. Моделі з абсолютним пріоритетом гарантують найвищу ймовірність обслуговування.

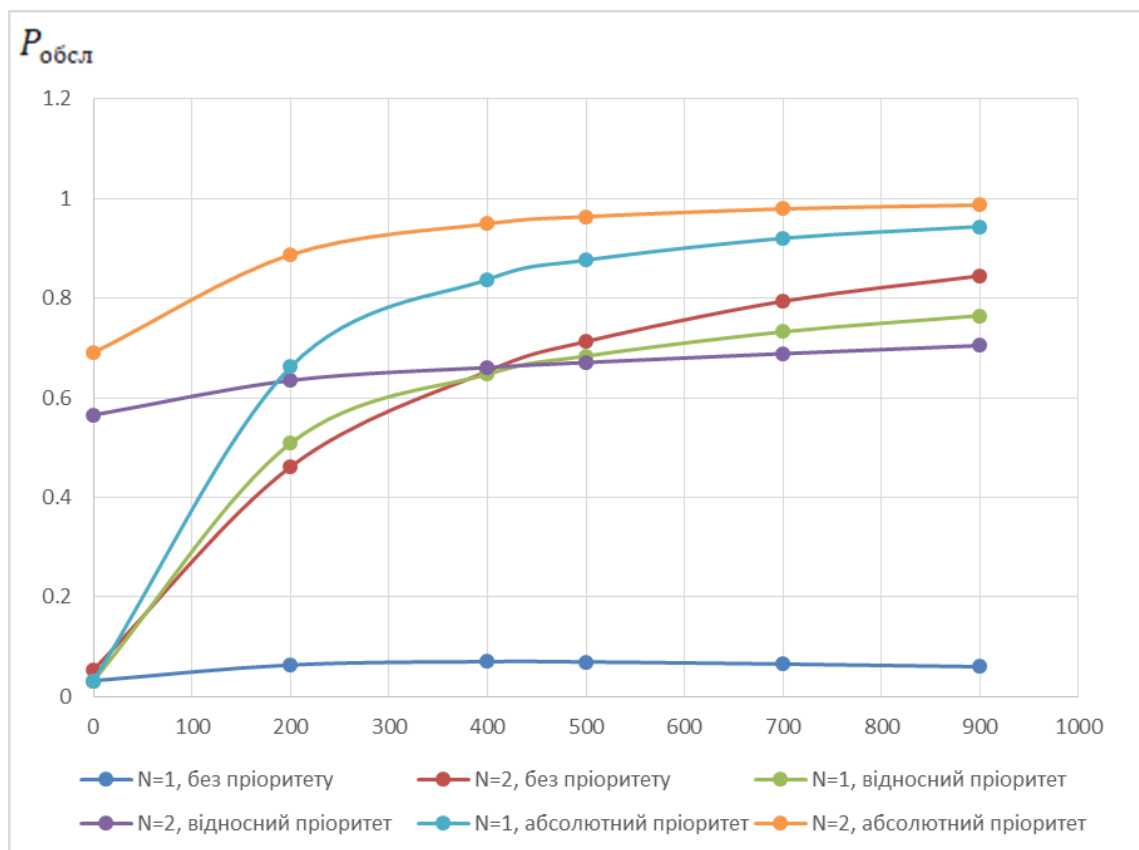


Рисунок 2.37 - Графік динаміки показників ймовірності обслуговування заявок першого потоку в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

На рис. 2.37 спостерігаються дві точки перетину. Перша точка виникла при  $\lambda_1=200$  між графіками показників ймовірності обслуговування заявок першого типу в СМО з двома ОП при відносному пріоритеті та СМО з одним ОП при абсолютному пріоритеті. При малих вхідних навантаженнях СМО з двома ОП дійсно здатна забезпечити вищу ймовірність обслуговування, але зі збільшенням інтенсивності надходження заявок першого типу абсолютний пріоритет надає

безумовну перевагу заявкам вищого пріоритету (в даному випадку заявки першого потоку є пріоритетними).

Наступна точка перетину спостерігається при  $\lambda_1=400$ , при чому з першого погляду здається дивним, що безпріоритетна модель забезпечує вищу ймовірність обслуговування, ніж СМО з відносним пріоритетом. Проте такому явищу є логічне пояснення: в безпріоритетних моделях чим активніший потік заявок, тим вищі показники QoS він отримує. Натомість, СМО з відносним пріоритетом все-таки забезпечують обслуговування заявок нижчого пріоритету, що наносить певний збиток пріоритетним заявкам.

Стосовно заявок другого типу ситуація віддзеркалюється: найбільш вигідною для заявок нижчого пріоритету є безпріоритетні моделі, на другому місці моделі з відносним пріоритетом, і найбільш жорсткими до заявок 2-го потоку знову виявилися СМО з абсолютним пріоритетом, оскільки в даних моделях ймовірність обслуговування не перевищує 20%.

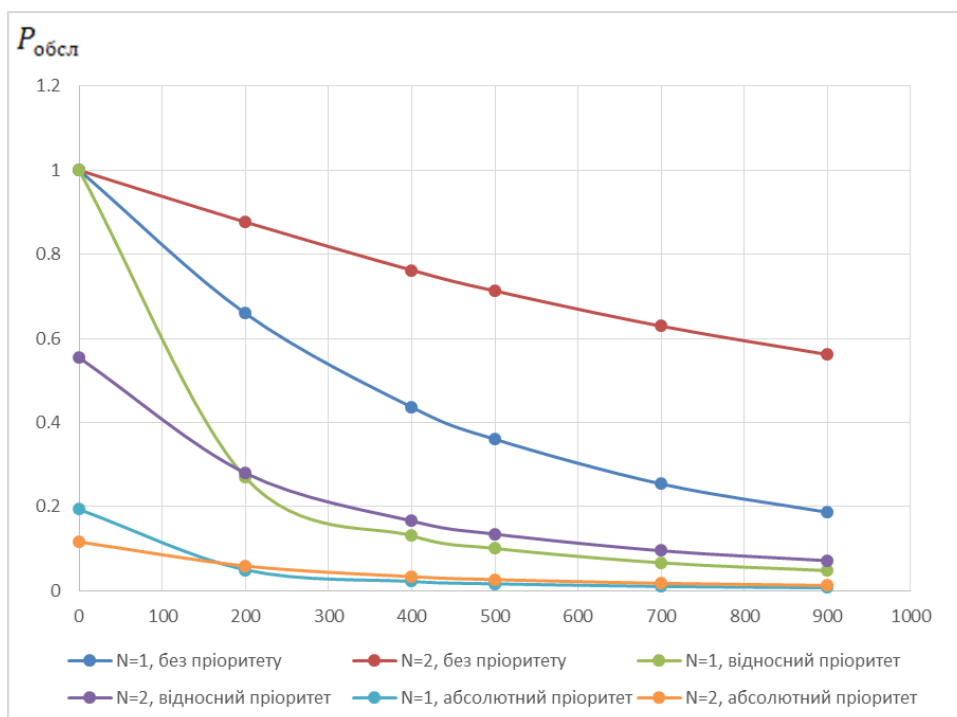


Рисунок 2.38 - Графік динаміки показників ймовірності обслуговування заявок другого потоку в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Згідно 4-го показника Літтла розглянемо динаміку показника ймовірності зайнятості системи  $P_{\text{зан}}$  (рис. 2.39). Найбільш зайнятою заявками 1-го типу, а отже з найменшою ймовірністю простою  $P_{0-0}$ , є СМО з двома ОП та абсолютним пріоритетом. Дещо нижчі показники  $P_{\text{зан}}$  має система з відносним пріоритетом та двома ОП. Ще нижчі показники мають СМО з одним обслуговуючим приладом та пріоритетним обслуговуванням, і найнижчі показники отримали безпріоритетні СМО.

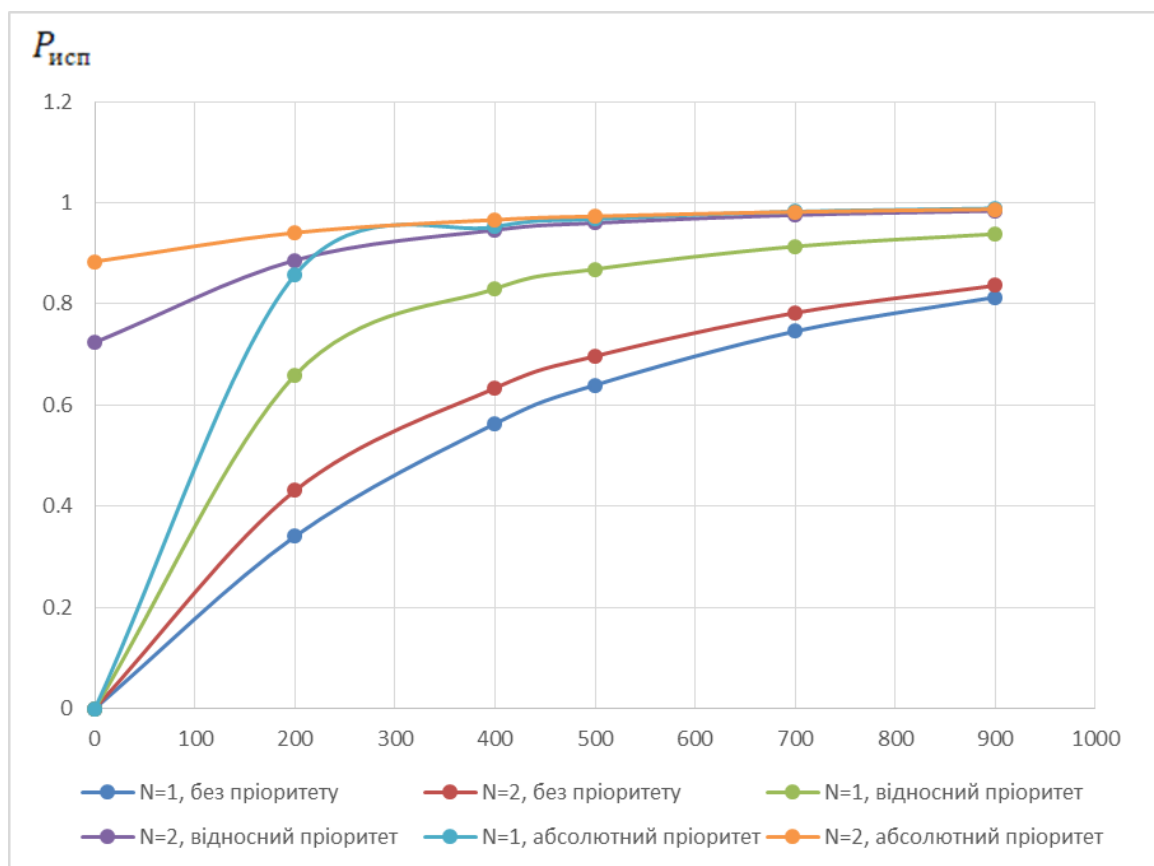


Рисунок 2.39 - Графік динаміки показників ймовірності зайнятості системи заявками першого потоку в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Для заявок другого потоку картина протилежна: зі зростанням параметра  $\lambda_1$  ймовірність зайнятості системи заявками другого потоку знижується, що обумовлено наявністю пріоритетного обслуговування та сталим вхідним навантаженням заявками другого типу. Безпріоритетні моделі мають найвищі

показники  $P_{зан}$ , а найнижчі – моделі з абсолютним пріоритетом. Варто відзначити точку перегину  $\lambda_1=330$ , при якій модель з двома ОП та відносним пріоритетом випереджає безпріоритетну СМО з одним обслуговуючим приладом.

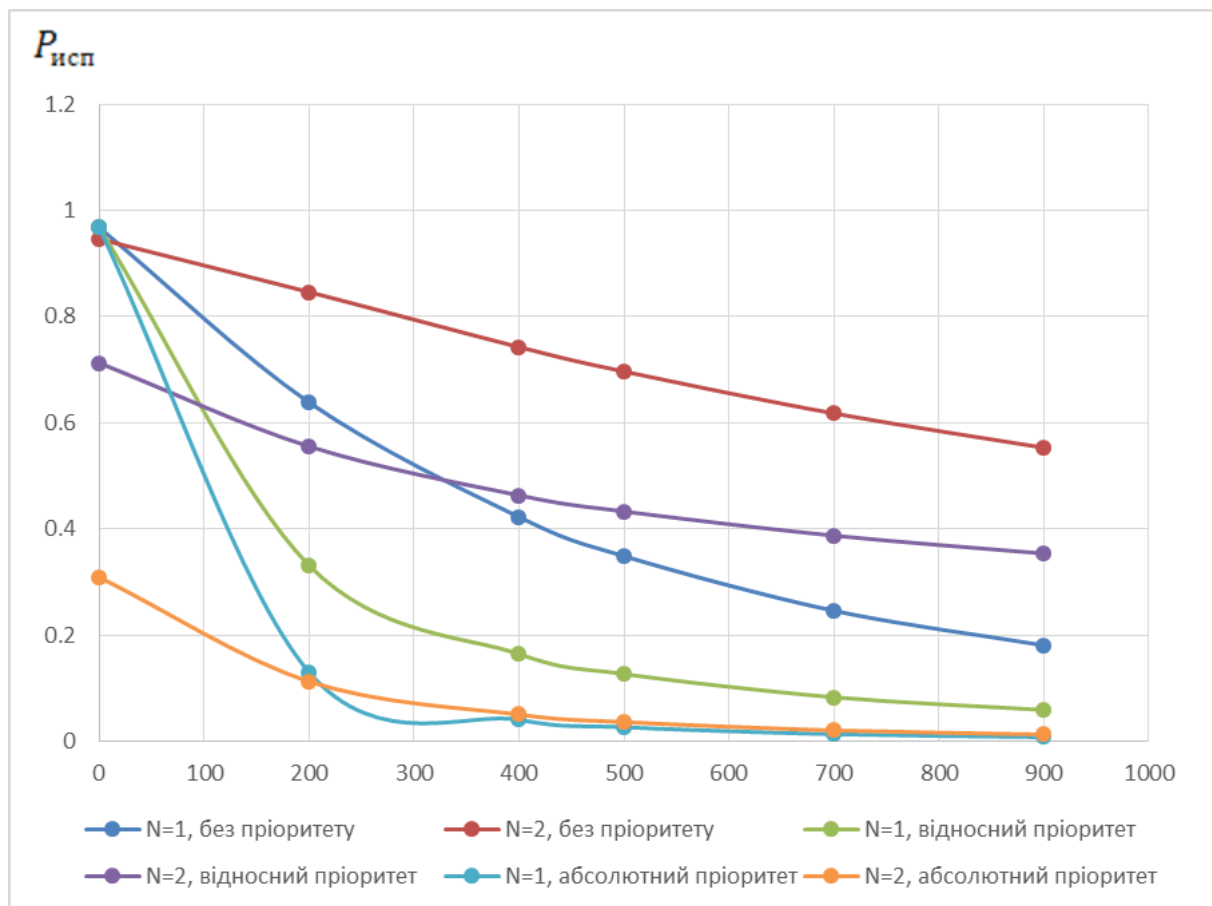


Рисунок 2.40 - Графік динаміки показників ймовірності зайнятості системи заявками другого потоку в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Розглянемо динаміку показника обслуженого навантаження, що збігається з показником продуктивності системи. На рис. 2.41 спостерігається сформована тенденція: абсолютний пріоритет забезпечує заявкам першого типу найвищі показники обслуженого навантаження, дещо нижчі – відносний пріоритет і найнижчі показники гарантують безпріоритетні системи.

На рис. 2.42 наведений графік динаміки обслуженого навантаження заявок другого типу в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу. В черговий раз ми переконалися, що безпріоритетні моделі є найбільш

вигідними для заявок нижчого пріоритету, відносний пріоритет дає шанс заявкам другого типу на обслуговування, натомість абсолютний пріоритет наближує обслужене навантаження заявок 2-го типу до нуля.

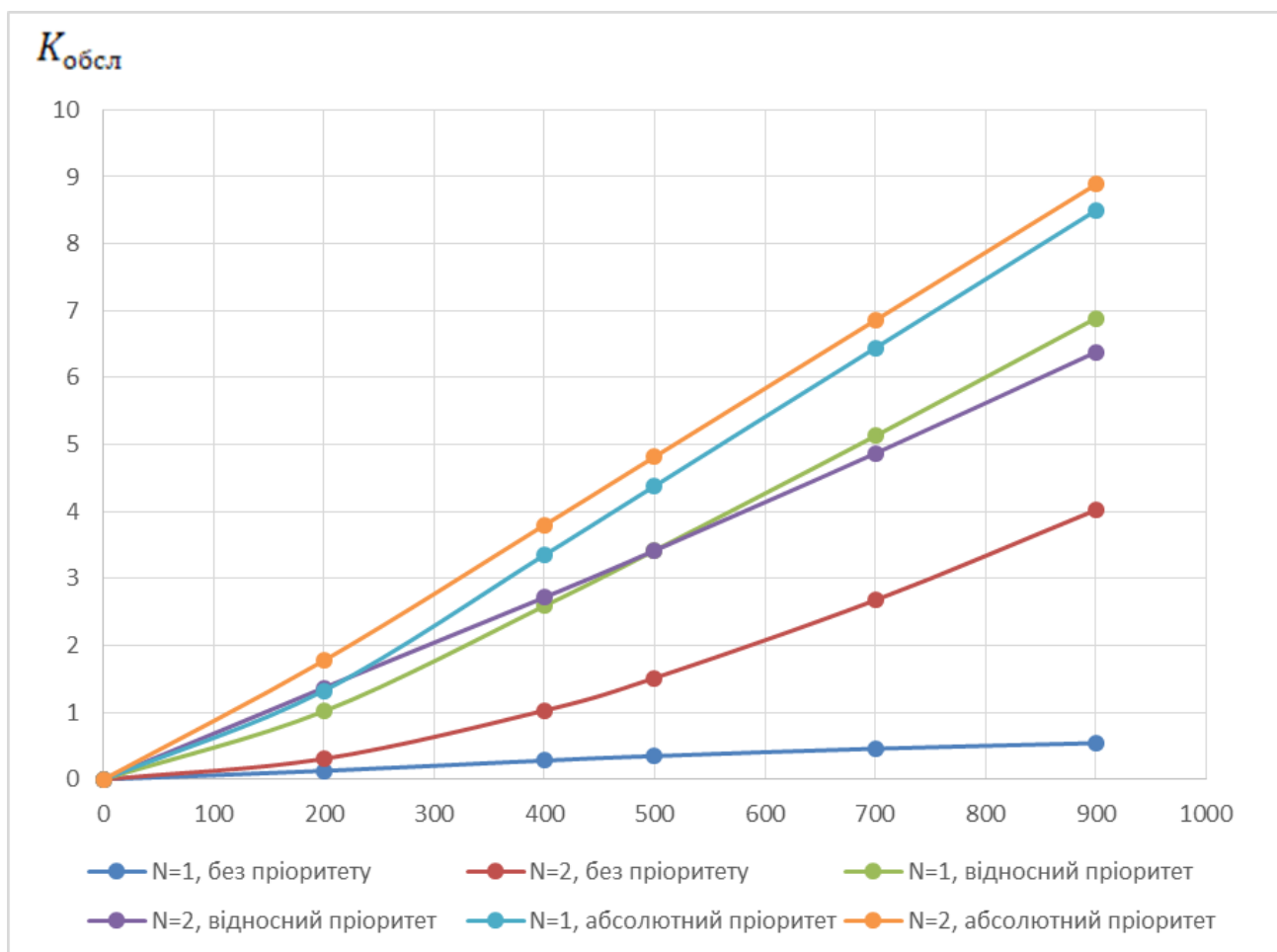


Рисунок 2.41 - Графік динаміки показників обслуженого навантаження заявок першого типу в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу



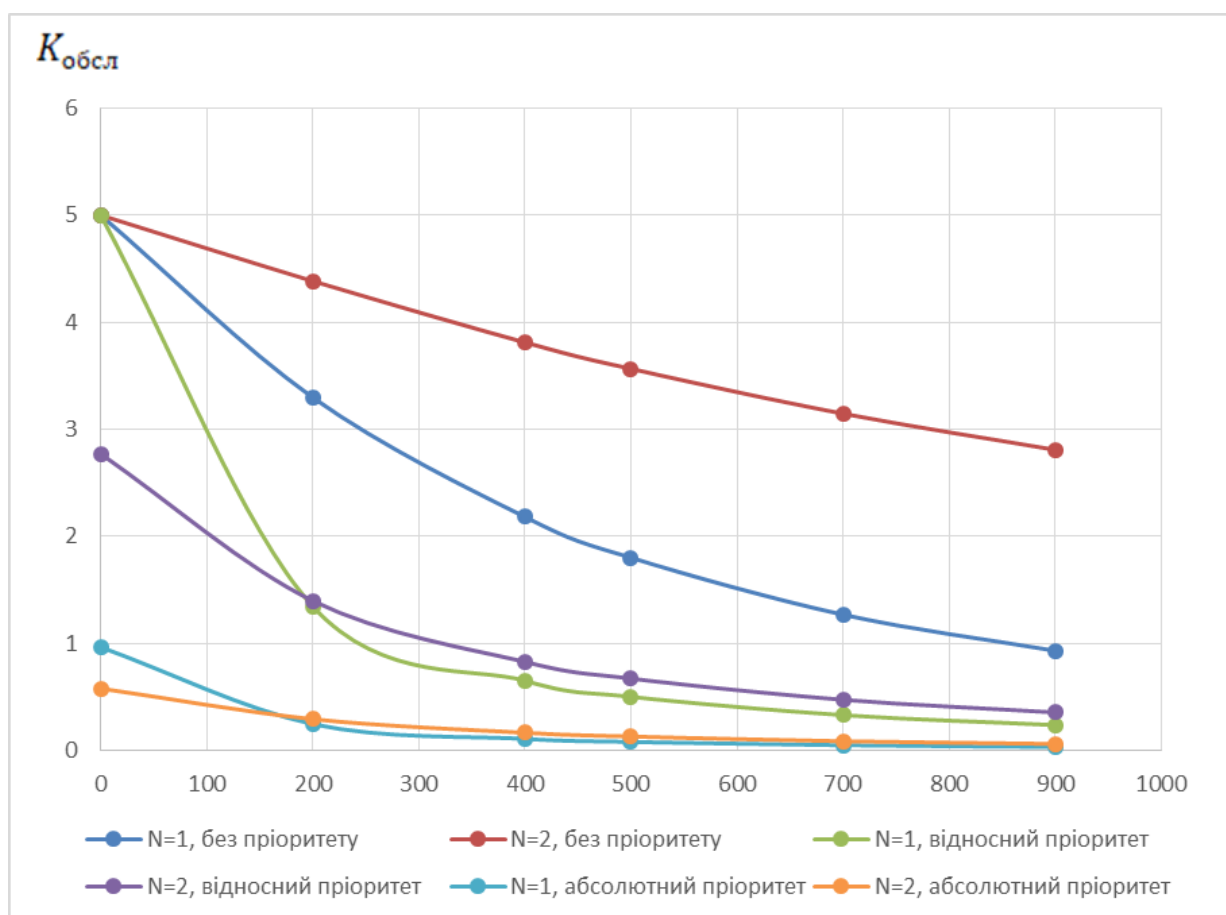


Рисунок 2.42 - Графік динаміки показників обслуженого навантаження заявок другого типу в залежності від зростання інтенсивності надходження заявок 1-го типу

Таким чином, можна зробити наступні висновки про роль пріоритетного обслуговування у динаміці показників якості обслуговування:

- В момент переповнення місць для черги введення пріоритетного обслуговування стає панацеєю, яка забезпечує обслуговування пріоритетних заявок і, за можливістю, заявок нижчого пріоритету;
- При розгляді динаміки показника ймовірності зайнятості системи  $P_{\text{зан}}$  заявками 2-го типу виникла точка перегину  $\lambda_1=330$ , при якій модель з двома ОП та відносним пріоритетом випереджає безпріоритетну СМО з одним обслуговуючим приладом.

- При  $\lambda_1=400$  спостерігається точка перегину, після якої безпріоритетна СМО виграє у моделей з відносним пріоритетом максимум на 12% за показником ймовірності обслуговування  $P_{\text{обсл}}$ .
- Виявлено, що найбільш вигідною для обслуговування заявок першого типу є СМО з абсолютним пріоритетом, на другому місці СМО з відносним пріоритетом, і найнижчі показники мають безпріоритетні моделі.
- Для заявок другого типу ситуація віддзеркалюється: найжорсткішою для заявок другого типу є СМО з абсолютним пріоритетом, а найбільш вигідною – безпріоритетні моделі.
- В загальному випадку введення пріоритетного обслуговування значно покращує якість обслуговування заявок вищого пріоритету, ніж збільшення числа ОП та введення черги.

## 2.4 Висновки до розділу 2

1. Структуру будь-якої СМО можна представити наступними рівнями:

- $i=0$ : система вільна від обслуговування заявок;
- $i=1 \dots n$ : зайнято  $1 \dots n$  обслуговуючий прилад;
- $i=n+1 \dots m$ : зайняті місця в черзі на обслуговування; також може бути

наявний рівень пріоритетів (заявки «вступають в боротьбу» за місце в черзі).

1. Найпростішим способом покращити показники якості обслуговування є збільшення числа обслуговуючих приладів. Зі збільшенням числа обслуговуючих приладів (ОП) ймовірність простою системи зменшується, а ймовірність зайнятості СМО навпаки збільшується. Зі збільшенням вхідного навантаження ймовірність відмови завжди наближена до 1, при цьому ймовірність обслуговування зростає. Збільшується середня кількість заявок в системі, проте перевага в даному випадку незначна. Також, через відсутності місць для черги показники середнього числа заявок і обслуженого навантаження збігаються  $Z_{\text{сист}} = K_{\text{обсл}}$ .

2. Використання черг усуває проблеми перевантаження у моменти бурхливого зростання інтенсивності трафіка. Завдяки наявності місць для черги спостерігається значний приріст продуктивності для заявок 1-го типу (20%), дещо менший для заявок другого типу – 12%. Збільшення числа обслуговуючих приладів є відносно більш дієвим методом покращення показників продуктивності.

3. Спостерігається суттєве зниження ймовірності відмови в обслуговуванні заявки при зростанні інтенсивності вхідного навантаження заявками 1-го типу у системах з чергою. Зауважимо, що при збільшенні числа обслуговуючих приладів приріст ймовірності відмови був помітно меншим. Середня кількість заявок в системі значно збільшується у порівнянні з моделями без черги.

4. Часові параметри є оберненими до показників середнього числа заявок, обслуженого навантаження і середнього числа заявок в черзі. Показано, що наявність черги поліпшує часові показники.

5. В момент переповнення місць для черги вибір, доцільної для поточного стану СМО, дисципліни обслуговування стає панацеєю, яка забезпечує обслуговування пріоритетних заявок і, за можливістю, заявок нижчого пріоритету.

6. При скачках інтенсивності вхідного навантаження, потрібно переходити від однієї дисципліни обслуговування до іншої, залежно від того, яка із запропонованих є найбільш оптимальною в поточному стані СМО. Для цього інженерові телекомунікаційних систем необхідно оволодіти прийомами ситуаційного керування.

7. Зокрема було виявлено, що найбільш вигідною для обслуговування заявок першого типу є СМО з абсолютним пріоритетом, дещо нижчі показники гарантує обслуговування з використанням відносного пріоритету, і найнижчі показники мають безпріоритетні моделі. Натомість для заявок другого типу ситуація віддзеркалюється: найжорсткішою для заявок другого типу є СМО з абсолютним пріоритетом, а найбільш вигідною – безпріоритетні моделі.

8. В загальному випадку введення пріоритетного обслуговування значно покращує якість обслуговування заявок вищого пріоритету, ніж збільшення числа ОП та введення черги. Проте, введення місць для черги в пріоритетних моделях підвищують шанси заявок нижчого пріоритету на успішне обслуговування. Варто відзначити, що застосування комбінованого пріоритету також підвищує показники QoS для непріоритетних заявок, оскільки виділяється фіксований час  $\Delta t_0$  на очікування обслуговування. Точки перетину, що спостерігалися на графіках даного розділу, спонукають до застосування ситуаційного керування. Для безпріоритетних СМО збільшення числа обслуговуючих приладів є більш ефективним інструментом для підвищення показників QoS.

### 3 РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОЇ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ МУЛЬТИПОТОКОВОЇ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ З ДОВІЛЬНИМ ЧИСЛОМ ОБСЛУГОВУЮЧИХ ПРИЛАДІВ, ЧЕРГОЮ ТА ПРІОРИТЕТНИМ ОБСЛУГОВУВАННЯМ

Для визначення кількісної оцінки параметрів якості обслуговування СМО інженер телекомунікаційної системи змушений витратити власні часові ресурси на вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відомими з курсу математичного аналізу матричним і гауссівським методами, з сумнівною точністю результатів, яку здатна гарантувати ЕОМ [15]. Даний розділ спрямований на створення універсальної аналітичної моделі, зручної для використання у повсякденній роботі інженера.

Розглянемо процес створення аналітичних моделей від найпростіших графів станів до систем масового обслуговування з довільною структурою. Заявки діляться на два типи: потік заявок вищого пріоритету (першого типу) – термінові повідомлення (голосові повідомлення, відео-конференції), а також потік заявок нижчого пріоритету (другого типу) – скачування файлів.

Значне число задач теорії масового обслуговування вирішуються на основі моделювання процесів доступу і обслуговування в СМО у вигляді схеми «розмноження і гибелі».

Процес розмноження і гибелі – випадковий процес зі зліченою (фінітною або нескінченною) множиною станів, що протікають в дискретному і неперервному часі. Процес полягає в тому, що деяка система у випадкові моменти часу переходить з одного стану в інший, при чому переходи між станами відбуваються скачками, коли відбуваються певні події. Зазвичай, події діляться на два типи: одна з них умовно називають «народженням» деякого об'єкта, інше – гибеллю цього об'єкта[6].

В загальному випадку під процесом розмноження і гибелі розуміють систему з дискретним набором станів  $P_0, P_1, P_2, \dots$ , множина яких скінченна ( $N$ ) або є зліченою, при чому кожен з цих станів зв'язане з двома сусідніми станами

прямим та зворотнім зв'язком, але крайні стани ( $0$  та  $N$ ) мають тільки по одному сусідньому. Процес розмноження і гибелі зображується однолінійним ланцюжком Маркова (рис. 3.1).

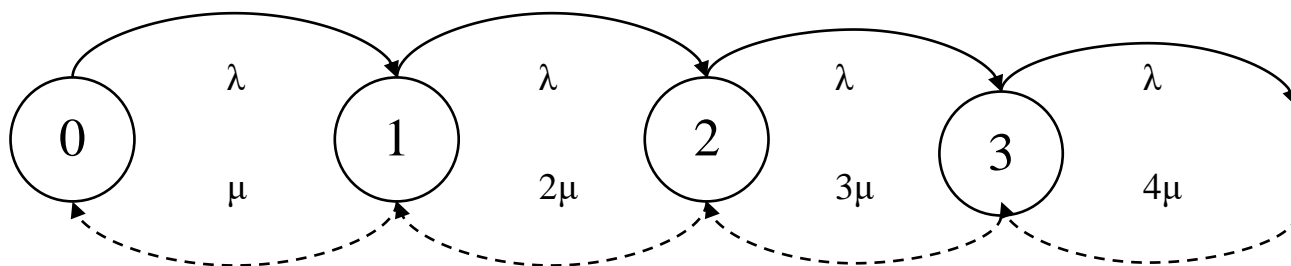


Рисунок 3.1 - Ланцюг станів і переходів в СМО з  $N$  обслуговуючими приладами (M/M/N)

Таким чином, «будівельним матеріалом» для математичних виразів обчислення станів СМО виступають параметри  $\lambda_1, \lambda_2$  – інтенсивності надходження заявок відповідно першого і другого типу та  $\mu_1, \mu_2$  – інтенсивності обслуговування заявок першого і другого типу відповідно. Відношення інтенсивностей надходження заявок та їх обслуговування будемо характеризувати параметром  $\rho = \lambda/\mu$  – інтенсивність вхідного навантаження, Ерл.

3.1 Комплексна аналітична модель для безпріоритетних СМО з довільним числом обслуговуючих приладів при різноманітних дисциплінах обслуговування

3.1.1 Комплексна аналітична модель для безпріоритетних СМО з довільним числом обслуговуючих приладів

Для освоєння принципу створення аналітичних моделей СМО, розглянемо найпростіші моделі систем масового обслуговування. В безпріоритетних моделях найбільш активний потік заявок отримує більше шансів на обслуговування. Порівняємо безпріоритетні СМО з одним та двома обслуговуючими приладами.

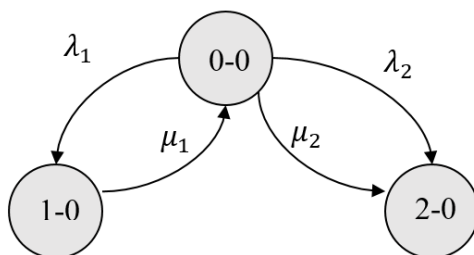


Рисунок 3.2 - Безпріоритетна СМО з одним обслуговуючим приладом та двома потоками

Щоб отримати формули обчислення кожного стану такої СМО, потрібно розв'язати наступну систему рівнянь[13]:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2) = P_{1-0}\mu_1 + P_{2-0}\mu_2 \\ P_{1-0}\mu_1 = P_0\lambda_1 \\ P_{2-0}\mu_2 = P_0\lambda_2 \\ P_0 + P_{1-0} + P_{2-0} = 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

Розв'язком цієї системи рівнянь є наступний вираз:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \rho_1 + \rho_2}, \text{ де} \quad (3.2)$$

$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ . Тепер розглянемо дещо ускладнену СМО з двома потоками і двома обслуговуючими приладами.

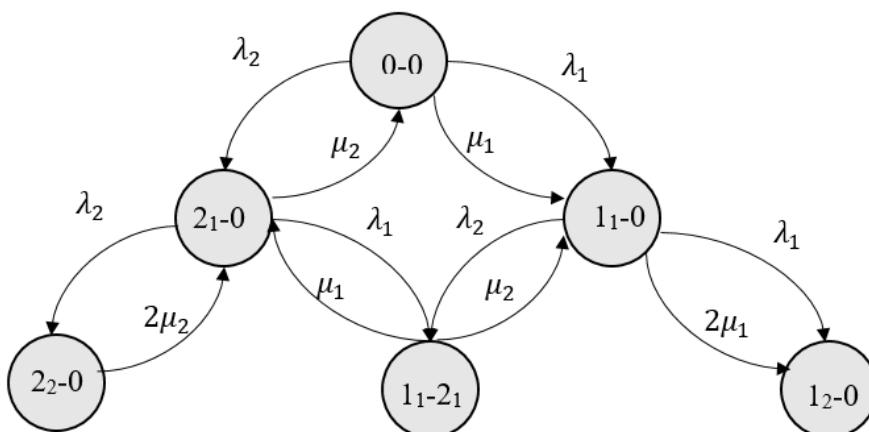


Рисунок 3.3 - Безпріоритетна СМО з двома обслуговуючими приладами та двома потоками

Графічній моделі на рис. 3.3 відповідає наступна система алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2) = P_{1-0}\mu_1 + P_{2-0}\mu_2 \\ P_{1-0}(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) = P_0\lambda_1 + P_{1_1-2_1}\mu_2 + P_{1_2-0}2\mu_1 \\ P_{2-0}(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) = P_0\lambda_2 + P_{1_1-2_1}\mu_1 + P_{2_2-0}2\mu_2 \\ P_{2_2-0}2\mu_2 = P_{2-0}\lambda_2 \\ P_{1_1-2_1}(\mu_1 + \mu_2) = P_{1-0}\lambda_2 + P_{2-0}\lambda_1 \\ P_{1_2-0}2\mu_1 = P_{1-0}\lambda_1 \\ P_0 + P_{1-0} + P_{2-0} + P_{1_2-0} + P_{1_1-2_1} + P_{2_2-0} = 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

Розв'язком цієї системи системи рівнянь є наступний вираз:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \frac{\rho_1^2}{2} + \rho_1\rho_2 + \frac{\rho_2^2}{2}} \quad (3.4)$$

Розглянемо приклад безпріоритетної СМО з двома потоками, одним обслуговуючим приладом та одним місцем у черзі.

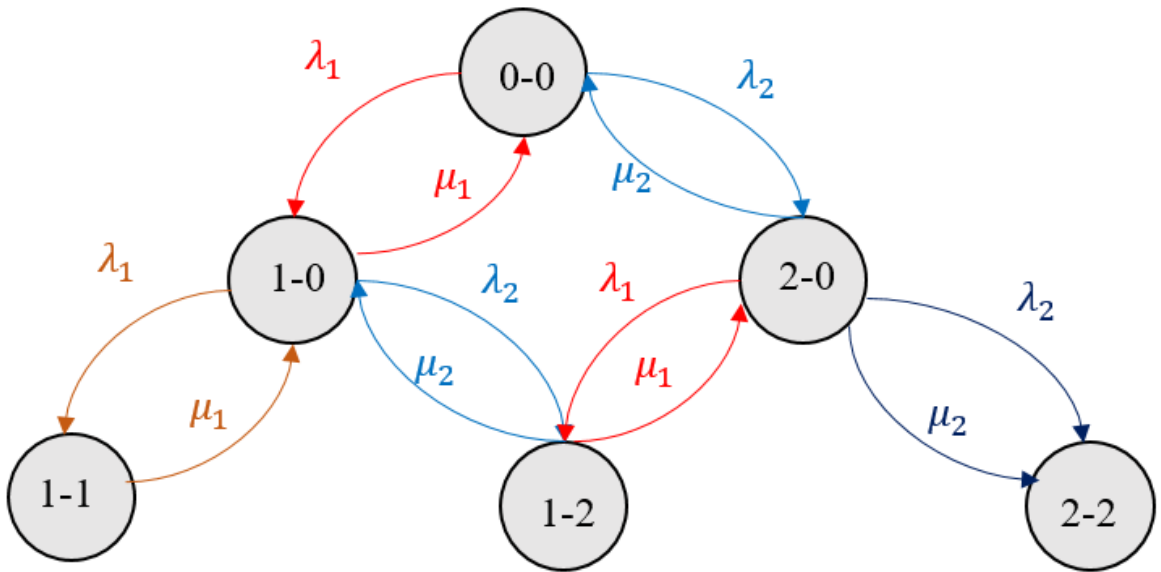


Рисунок 3.4 - Безпріоритетна СМО з одним приладом, двома потоками та чергою



Такій графічній моделі еквівалентна наступна СЛАР:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2) = P_{1-0}\mu_1 + P_{2-0}\mu_2 \\ P_{1-0}(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) = P_0\lambda_1 + P_{1-2}\mu_2 + P_{1-1}\mu_1 \\ P_{2-0}(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) = P_0\lambda_2 + P_{1-2}\mu_1 + P_{2-2}\mu_2 \\ P_{2-2}\mu_2 = P_{2-0}\lambda_2 \\ P_{1-2}(\mu_1 + \mu_2) = P_{1-0}\lambda_2 + P_{2-0}\lambda_1 \\ P_{1-1}\mu_1 = P_{1-0}\lambda_1 \\ P_0 + P_{1-0} + P_{2-0} + P_{1-2-0} + P_{1-1-2_1} + P_{2-2-0} = 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Розв'язком цієї системи системи рівнянь є наступний вираз:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_1^2 + \rho_1\rho_2 + \rho_2^2} \quad (3.6)$$

Варто відзначити, що формула обчислення стану графу  $P_0$  є базовою, оскільки підставляючи в чисельник будь-який доданок знаменника, отримаємо формули обчислення решти станів СМО. В свою чергу, кожен доданок являє собою шлях від  $P_0$  до конкретного стану і назад. Також, кількість доданків у знаменнику виразу дорівнює кількості станів графу.

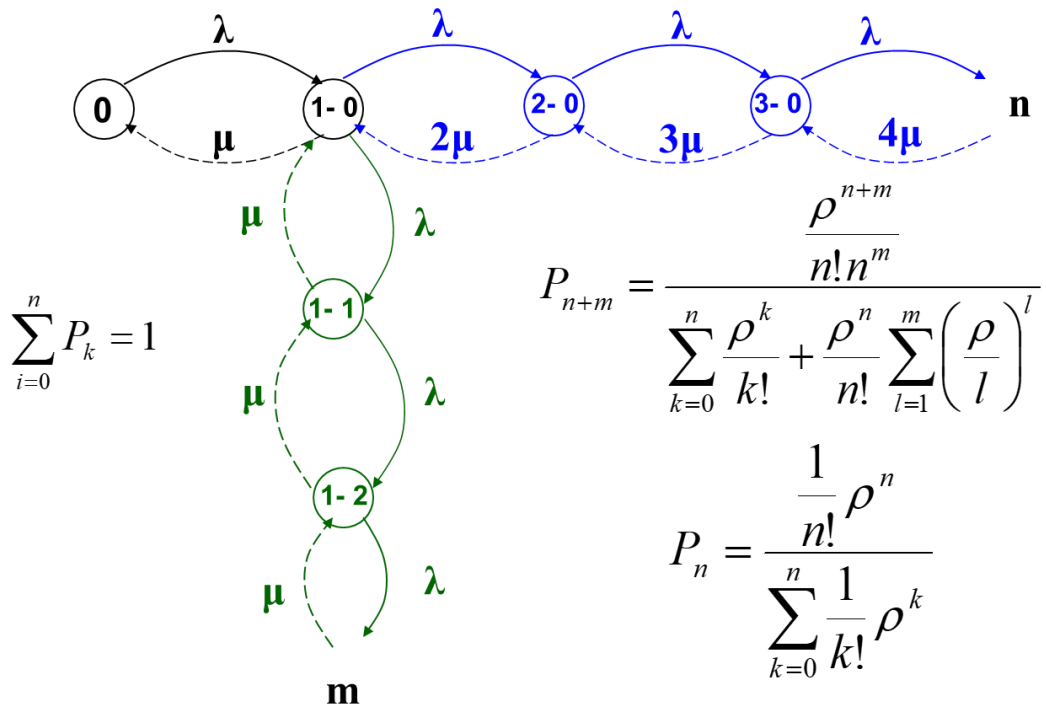


Рисунок 3.5 - Система з детермінованою ідентифікацією станів

З рис. 3.5 зробимо наступний висновок: чисельник математичного виразу обчислення ймовірності стану, що відображає рівень зайнятості  $n$ -го обслуговуючого пристрою дорівнює  $p_n = \frac{\rho^n}{n!}$ , а чисельник виразу обчислення ймовірності перебування заявки в  $n+m$ -му місці для черги, де  $n$  – номер обслуговуючого приладу,  $m$  – номер місця в черзі, дорівнює  $p_{n+m} = \frac{\rho^{n+m}}{n!n^m}$ .

### 3.1.2 Комплексна аналітична модель для СМО з довільним числом обслуговуючих пристроїв при пріоритетному обслуговуванні

Для опису загальних закономірностей взаємодії потоків в СМО з пріоритетами розглянемо мультипотоків пріоритетні СМО з одним та двома обслуговуючими приладами (ОП). При цьому об'єктами моделювання і порівняння виступають СМО з двома видами пріоритетів[13]:

- абсолютний, який полягає в тому, що вимога вищого пріоритету перериває обслуговування вимоги нижчого пріоритету .
- відносний, який полягає в тому, що вимога вищого пріоритету стає на початок черги без переривання до кінця обслуговування поточної заявки.

Доцільна розробка такого уніфікованого математичного апарату, який був би однаково прийнятним для отримання характеристик СМО з абсолютним та відносним пріоритетним обслуговуванням.

Приклад графу, який відповідає цій умові представлено на рис. 3.6.

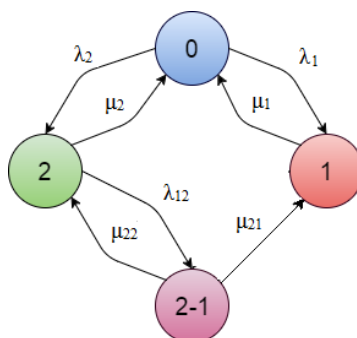


Рисунок 3.6 – Уніфікована СМО з двома потоками та одним приладом обслуговування

Поставимо у відповідність графу станів (рис. 3.6) систему рівнянь, яка допоможе отримати уніфіковану формулу, що буде задовольняти заявленим дисциплінам масового обслуговування:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2) = P_1 \cdot \mu_1 + P_2 \cdot \mu_2 \\ P_1\mu_1 = P_0 \cdot \lambda_1 + P_{2-1} \cdot \mu_{21} \\ P_2(\mu_2 + \lambda_{12}) = P_0 \cdot \lambda_2 + P_{2-1} \cdot \mu_{22} \\ P_{2-1} \cdot (\mu_{21} + \mu_{22}) = P_2 \cdot \lambda_{12} \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_{2-1} = 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

Знайдемо ймовірність простою приладу обслуговування  $P_0$  як базового для визначення ймовірностей інших станів та показників обслуговування СМО.

Для цього виразимо  $P_1, P_2, P_{2-1}$  через  $P_0$  та отримаємо:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 \cdot \rho_1 + P_0 \cdot \frac{\lambda_2 \mu_{21} \lambda_{12}}{(\mu_2 + \lambda_{12} - \frac{\lambda_{12} \mu_{22}}{\mu_{12}}) \mu_{12} \mu_1} \\ P_2 &= P_0 \cdot \frac{\lambda_2}{(\mu_2 + \lambda_{12} - \frac{\lambda_{12} \mu_{22}}{\mu_{12}})} \\ P_{2-1} &= P_0 \cdot \frac{\lambda_2 \lambda_{12}}{(\mu_2 + \lambda_{12} - \frac{\lambda_{12} \mu_{22}}{\mu_{12}}) \mu_{12}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\text{де } \mu_{12} = \mu_{21} + \mu_{22} \quad (3.9)$$

Отримані значення підставимо в умову нормування:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_{2-1} = 1 \quad (3.10)$$

Таким чином, ймовірність стану приладу обслуговування  $P_0$  у випадку узагальненої СМО:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \rho_1 + \frac{\lambda_2 \mu_{21} \lambda_{12}}{(\mu_2 + \lambda_{12} - \frac{\lambda_{12} \mu_{22}}{\mu_{12}}) \mu_{12} \mu_1} + \frac{\lambda_2}{(\mu_2 + \lambda_{12} - \frac{\lambda_{12} \mu_{22}}{\mu_{12}})} + \frac{\lambda_2 \lambda_{12}}{(\mu_2 + \lambda_{12} - \frac{\lambda_{12} \mu_{22}}{\mu_{12}}) \mu_{12}}} \quad (3.11)$$

Впевнимся, що ця формула при підстановці різних умов буде відповідати пріоритетним видам СМО[13].

1. Система з відносним пріоритетом повинна задовольняти таким умовам:  $\lambda_{12} = \lambda_1; \mu_{21} = \mu_2; \mu_{22} = 0$ .

Тоді із (3.11) отримаємо вираз:

$$P_0 = \frac{1}{1 + (\rho_1 + p_2 * \rho_1) + p_2 + (p_2 * \frac{\lambda_1}{\mu_2})} = \frac{1}{1 + \left( \rho_1 + \rho_2 * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}} * \rho_1 \right) + \left( \rho_2 * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}} \right) + \left( \rho_2 * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}} * \frac{\lambda_1}{\mu_2} \right)} \quad (3.12)$$

2. Система з абсолютним пріоритетом повинна задовольняти таким умовам:  $\lambda_{12} = \lambda_1$ ;  $\mu_{21} = \infty$ ;  $\mu_{22} = 0$ .

Тоді із (3.11) отримаємо вираз:

$$P_0 = \frac{1}{1 + (\rho_1 + p_2 * \rho_1) + p_2} = \frac{1}{1 + \left( \rho_1 + \rho_2 * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}} * \rho_1 \right) + \left( \rho_2 * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}} \right)} \quad (3.13)$$

Розглянемо СМО з одним ОП, двома потоками і одним місцем в черзі з абсолютним пріоритетом.

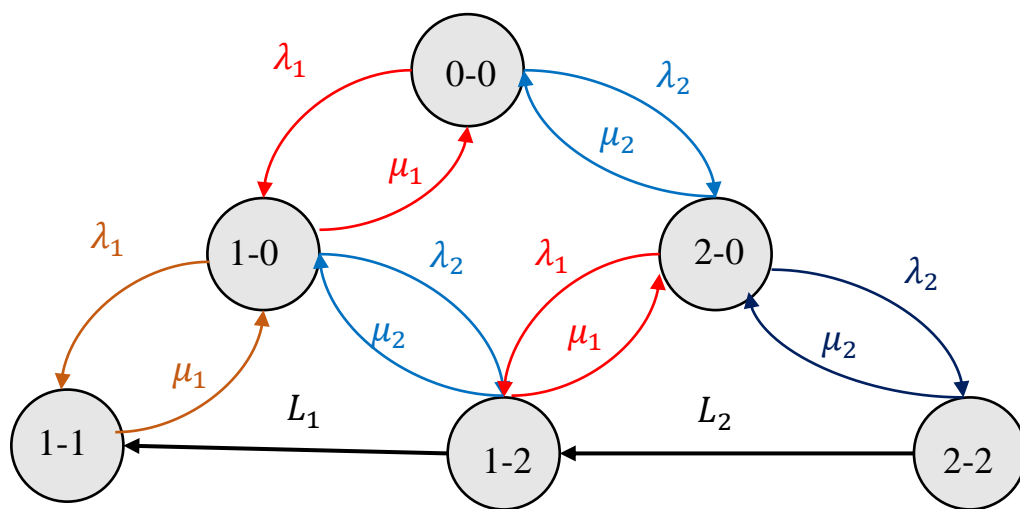


Рисунок 3.7 - Граф станів СМО з одним обслуговуючим приладом, двома потоками, чергою та пріоритетним обслуговуванням

Канонічна формула  $P_0$ :

$$P_0 = \frac{1}{1 + p_1 + p_2 + p_{11} + p_{12} + p_{22}} \quad (3.14)$$

Де  $p_{ij}$  – чисельники формул обчислення відповідних станів СМО (для  $P_{10} \rightarrow p_1$ , для  $P_{20} \rightarrow p_2$  і т.д.)

Коли заявки вступають в боротьбу за можливість обслуговування за допомогою пріоритетів відбувається наступне[14]:

- Стани діляться на 2 типи: стан «донор» (заявка нижчого пріоритету) і стан «реципієнт» (заявка вищого пріоритету);

- «Реципієнт» отримує додаткову можливість обслуговування за рахунок «донора», завдяки чому заявка вищого пріоритету переходить з черги на рівень вище, тобто на рівень обслуговування заявки. Приклад: стан 1-1 - «реципієнт», стан 1-2 - «донор».

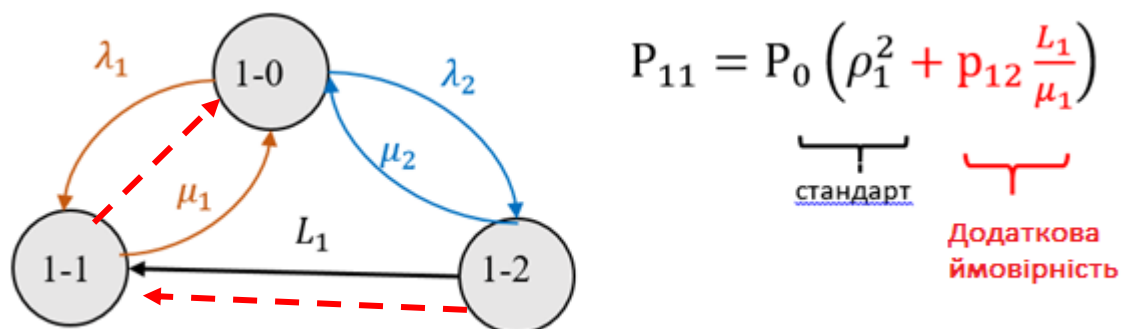


Рисунок 3.8 - Графічний та аналітичний приклад стану-реципієнта у СМО з пріоритетним обслуговуванням

- У свою чергу стан «донор» втрачає зайвий шанс на обслуговування, тому з'являється множник «втрати», через що в його чисельнику 1, а в знаменнику  $1 + \dots$ ), утворений вихідними лініями «донора» ( $L_2, \mu_2$ ). Приклад, стан 2-2 – донор, 1-2 – реципієнт.

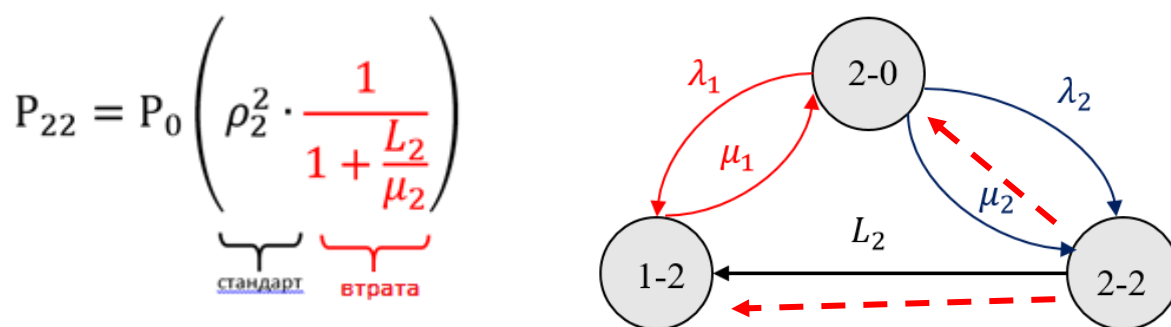


Рисунок 3.9 - Графічний та аналітичний приклад стану-донора у СМО з пріоритетним обслуговуванням

- Компромісний випадок: стан 1-2 , який є і донором, і реципієнтом. Ситуація наступна: стан отримує додаткову можливість обслуговування від стану 2-2, при цьому зберігається множник «втрати». Отримуємо вираз для обчислення ймовірності  $P_{12}$ :

$$P_{12} = P_0 \left( \underbrace{\rho_1 \rho_2}_{\text{стандарт}} + \underbrace{p_{22} \frac{L_2}{\mu_1 + \mu_2}}_{\text{Додаткова ймовірність}} \right) \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + \frac{L_1}{\mu_1 + \mu_2}}}_{\text{втрата}}$$

Рисунок 3.10 - Графічний та аналітичний приклад компромісного стану у СМО з пріоритетним обслуговуванням

- Проміжний стан (при відносному та комбінованому пріоритеті): стан  $1_1 - 1_2$  є проміжним, оскільки він призначений для очікування заявки вищого або нижчого пріоритету на заняття приладу. У математичній моделі ймовірність проміжного стану являє собою добуток ймовірності стану-донора і множника пріоритету. В свою чергу, множник пріоритету – відношення інтенсивності надходження заявки до проміжного стану до інтенсивності обслуговування заявки.

$$P_{1_1-1_2} = P_{1_1-2_1} * \frac{L_1}{M_2}$$

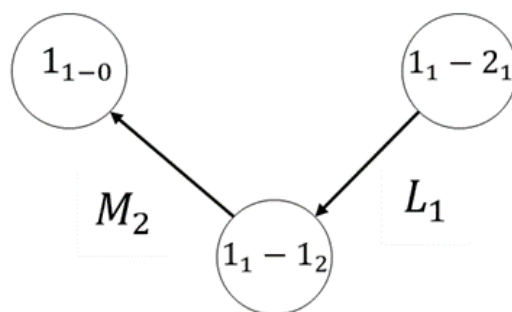


Рисунок 3.11 - Графічний та аналітичний приклад проміжного стану у СМО з пріоритетним обслуговуванням

Прийнявши до уваги тези, наведені вище побудуємо аналітичну модель для СМО з двома обслуговуючими приладами, двома потоками та пріоритетним обслуговуванням.

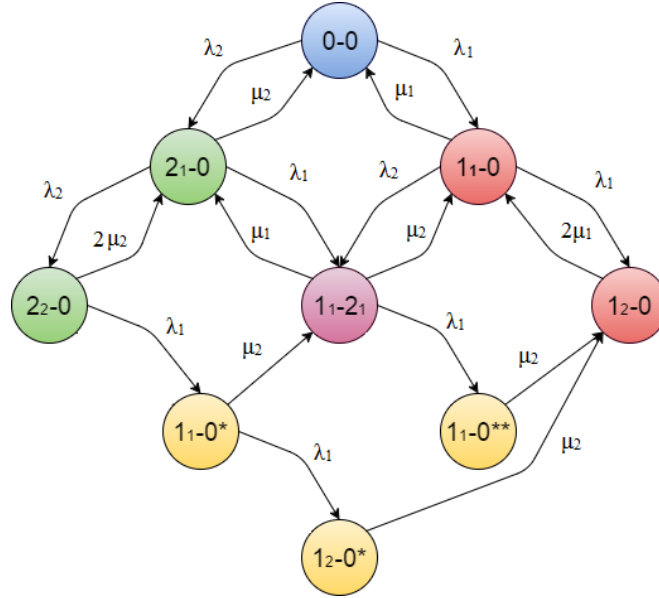


Рисунок 3.12 – СМО з двома потоками та двома приладами обслуговування (відносний пріоритет)

Канонічна формула для ймовірності  $P_{0-0}$ :

$$P_{0-0} = \frac{1}{1 + p_{11-0} + p_{21-0} + p_{12-0} + p_{11-21} + p_{22-0} + p_{11-0^*} + p_{11-0^{**}} + p_{12-0^*}} \quad (3.15)$$

Розпишемо кожен доданок знаменника отриманого виразу:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{11-0} = \rho_1 \\ p_{21-0} = \rho_2 \\ p_{12-0} = \frac{\rho_1^2}{2} + (p_{11-0^{**}} + p_{12-0^*}) \frac{\mu_2}{2\mu_1} \\ p_{11-21} = \left( \rho_1 \rho_2 + p_{11-0^*} * \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \right) * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \mu_2}} \\ p_{22-0} = \frac{\rho_2^2}{2} * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{2\mu_2}} \\ p_{11-0^*} = p_{22-0} * \frac{\lambda_1}{\mu_2} * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}} \\ p_{11-0^{**}} = p_{11-21} * \frac{\lambda_1}{\mu_2} \\ p_{12-0^*} = p_{11-0^*} * \frac{\lambda_1}{\mu_2} \end{array} \right. \quad (3.16)$$

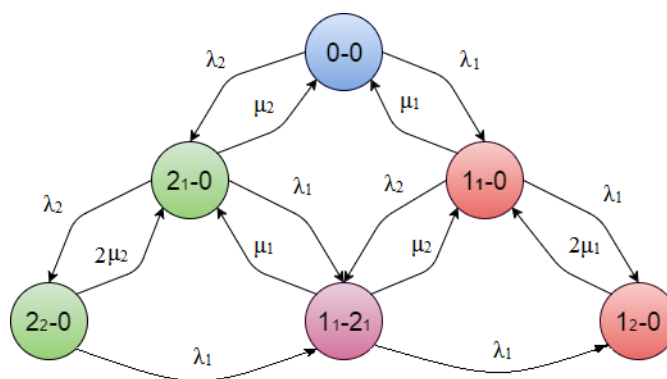


Рисунок 3.13 – СМО з двома потоками та двома приладами обслуговування (абсолютний пріоритет)

Канонічна формула для ймовірності  $P_{0-0}$ :

$$P_{0-0} = \frac{1}{1 + p_{11-0} + p_{21-0} + p_{12-0} + p_{11-21} + p_{22-0}} \quad (3.17)$$

Розпишемо кожен доданок знаменника отриманого виразу:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{11-0} = \rho_1 \\ p_{21-0} = \rho_2 \\ p_{12-0} = \frac{\rho_1^2}{2} + p_{11-21} \frac{\lambda_1}{2\mu_1} \\ p_{11-21} = \left( \rho_1 \rho_2 + p_{22-0} * \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \mu_2} \right) * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \mu_2}} \\ p_{22-0} = \frac{\rho_2^2}{2} * \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{2\mu_2}} \end{array} \right. \quad (3.18)$$

Отже, при побудові аналітичних моделей для СМО з пріоритетним обслуговуванням варто враховувати поведінку станів, що перебувають на рівні пріоритетів:

- Стан «донор» жертвує деяку частину власної ймовірності (множник втрати) на користь заявки вищого пріоритету;
- Стан «реципієнт» отримує додаткову ймовірність обслуговування від «донора», за рахунок чого у чисельнику формули обчислення ймовірності обслуговування «реципієнта» виникає доданок;
- Ймовірність зайнятості проміжного стану, присутнього при відносному і комбінованому пріоритеті, являє собою добуток ймовірності стану-донора і множника пріоритету.



### 3.2 Комплексна математична модель для СМО с 1 обслуживающим приладом і N потоками

Проведемо узагальнення розглянутої СМО в систему обслуговування з будь-якою кількістю вхідних пуассонівських потоків. На рис. 3.14, як приклад, зображена СМО з п'ятьма потоками заявок[4].

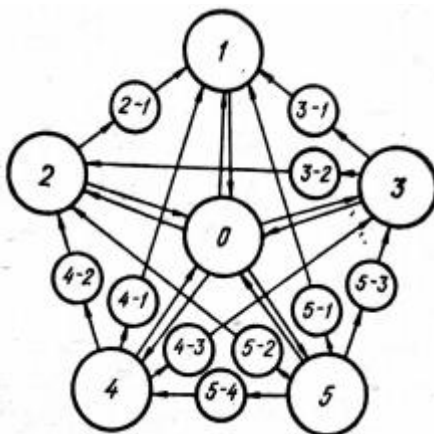


Рисунок 3.14 – Комплексна модель для СМО с 1 обслуживающим приладом і N потоками

СМО з комбінованим пріоритетним обслуговуванням  $N$  входять пуассонівських потоків заявок відповідає наступна система рівнянь в стаціонарних ймовірностях станів СМО[4]:

$$\begin{cases} P_0 \sum_{i=1}^N \lambda_i = \sum_{i=1}^N P_i \mu_i \\ P_i L_i = P_0 \lambda_i + \sum_{q=i+1}^N P_q W_{qi} \\ P_{qi} W_{qi} = P_q \lambda_i \\ P_0 + \sum_{i=1}^N S_i + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{q=i+1}^N P_{qi} = 1 \end{cases} \quad (3.19)$$

Рішенням цієї системи є система рівнянь:

$$\begin{cases} P_0 = \prod_{i=1}^N \frac{L_i}{Z_N} \\ P_q = \lambda_q \prod_{i=q+1}^N M_i \frac{\prod_{i=1}^{q-1} L_i}{Z_N} \\ P_{qi} = P_q V_{qi} \mid i < q \end{cases} \quad (3.20)$$

, де  $Z_N = \prod_{i=1}^N M_i + \sum_{k=1}^{N-1} [\sum_{i=1}^k V_{k+1} \prod_{i=1}^k L_i \lambda_{k+1} B_{k+2}]$

$$B_q = \prod_{i=q}^{N-1} L_i + \lambda_q B_{q+1}$$

$$\max\{B_q\} = B_{N+1} = 1. \quad (3.21)$$

В виразах (3.19) – (3.20) індекс змінної  $q$  означає номер заявки ( $q = 1, \dots, N$ ), яка відображається в стані графу і переходах від цієї заявки до інших суміжних станів[4].

Вирази спрощені за допомогою наступних позначень:

$$\begin{cases} L_i = \mu_i + \lambda_{i-1} + \dots + \lambda_1; \\ M_i = \mu_i + \lambda_i + \lambda_{i-1} + \dots + \lambda_1 = L_i + \lambda_i; \\ V_{qi} = \frac{\lambda_1}{W_{qi}}, \text{ где } W_{qi} = \frac{\mu_q}{1 - \exp(-\mu_{qi} \Delta t_{0qi})} \end{cases} \quad (3.22)$$

Тоді:

$$\begin{cases} P_0 = \prod_{i=1}^N \frac{L_i}{M_i}; \\ P_q = \frac{\lambda_q}{M_q} \prod_{i=1}^{q-1} \frac{L_i}{M_i}; \\ P_{\text{обсл}} = \frac{\mu_q}{M_q} \prod_{i=1}^{q-1} \frac{L_i}{M_i}; \end{cases} \quad (3.23)$$

Отримана система рівнянь (3.23) при  $\Delta t_0 = 0$  співпадає з характеристикою однолінійної СМО з абсолютним пріоритетом. При  $\Delta t_0 \rightarrow \infty$  вирази (3.11) – (3.12) описують однолінійну СМО з відносним пріоритетом, при чому  $V_{qi} = \frac{\lambda_i}{\mu_q}$ [4].

3.3 Методика розроблення комплексної математичної моделі з довільним числом обслуговуючих приладів, потоків та при різноманітних дисциплінах обслуговування

Розглянувши системи масового обслуговування з різноманітними структурами, сформулюємо методику побудови математичного виразу обчислення ймовірностей станів СМО:

1. Використовуючи метод індукції, можна стверджувати, що канонічні формули  $P_{0-0}$  та  $P_i$  мають наступний вигляд:

$$P_{0-0} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n+r} p_i} = \frac{1}{1 + p_{11-0} + p_{21-0} + \dots + p_{m_n-r}} \quad (3.24)$$

$$P_i = \frac{\rho_i}{1 + \sum_{i=1}^{n+r} p_i} = \rho_i \times P_{0-0} \quad (3.25)$$

де  $m$  – кількість потоків заявок,  $n$  – число обслуговуючих приладів,  $r$  – кількість місць у черзі. Кожен доданок знаменника – маршрут від  $P_0$  до відповідного стану  $i$  назад.

2. Розпишемо кожен доданок знаменник виразу (3.24):

а. чисельник математичного виразу обчислення ймовірності стану, що відображає рівень зайнятості  $n$ -го обслуговуючого пристрою дорівнює  $p_n = \frac{\rho^n}{n!}$

б. чисельник виразу обчислення ймовірності перебування заявки в  $n+r$ -му місці для черги, де  $n$  – номер обслуговуючого приладу,  $r$  – номер місця в черзі, дорівнює  $p_{n+r} = \frac{\rho^{n+r}}{n!n^r}$

с. При побудові аналітичних моделей для СМО з пріоритетним обслуговуванням варто враховувати поведінку станів, що перебувають на рівні пріоритетів:

- Стан «донор» жертвує деяку частину власної ймовірності (множник втрати) на користь заявки вищого пріоритету. Значення множника втрати має бути меншим 1, тому чисельник множника втрати дорівнює 1, а знаменник утворений сумою 1 і відношення ваг вихідних ребер зі стану «донор»:  $\frac{1}{1 + \frac{\sum L_i}{\sum \mu_i}}$

- Стан «реципієнт» отримує додаткову ймовірність обслуговування від «донора», за рахунок чого у чисельнику формули обчислення ймовірності обслуговування «реципієнта» виникає доданок, що є добутком ймовірності перебування заявки у стані «донора» і відношення ваг ребер від «донора» до станів рівня обслуговування заявок:  $p_{m_n-r} * \frac{L_i}{\sum \mu_i}$ ;
- Ймовірність зайнятості проміжного стану, присутнього при відносному і комбінованому пріоритеті, являє собою добуток ймовірності стану-донора і множника пріоритету. Множник пріоритету – відношення інтенсивності надходження заявок до проміжного стану до інтенсивності обслуговування заявки, що надійшла до проміжного стану:  $\frac{L_i}{M_i}$ .

### 3.4 Висновки до розділу 3

В третьому розділі розглянуті графічні моделі систем масового обслуговування (СМО) та відповідні їм аналітичні моделі:

- 1) аналітична модель для безпріоритетних СМО з довільним числом обслуговуючих приладів;
- 2) аналітична модель для СМО з довільним числом обслуговуючих пристроїв при пріоритетному обслуговуванні;
- 3) математична модель для СМО с 1 обслуговуючим приладом і  $N$  потоками при комбінованому пріоритеті обслуговування;

Визначено закономірності побудови формул обчислення ймовірностей перебування заявок у будь-якому стані СМО залежно від графічної моделі. Запропоновано методику розроблення комплексної математичної моделі з довільним числом обслуговуючих приладів, потоків та при різноманітних дисциплінах обслуговування

Виявлено вплив змін вхідних параметрів на аналітичну модель СМО, а саме вплив вибору пріоритету на величину інтенсивності обслуговування заявок, а отже на значення ймовірності перебування заявки в  $n$ -ому стані СМО.

Розроблено методику побудови комплексної математичної мультипоточної моделі з двома ОП та пріоритетним обслуговуванням, завдяки чому спеціаліст телекомунікацій позбавиться потреби вирішувати громіздкі СЛАР, аби обчислити показники QoS.

## ВИСНОВКИ

1. Основне зростання трафіку і доходів відбувається в секторі пристроїв інтернету речей, який є однією з базових цілей функціоналу 5G. Одним з основних функціональних особливостей мереж 5G є масивні межмашинні комунікації Massive IoT, mMTC.

2. Програма як послуга (Software as a Service, SaaS) «надає численні переваги працівникам та компаніям, значно скорочуючи час і гроші, витрачені на рутинні завдання»[3].

3. На каналному рівні головним об'єктом є часовий ресурс. Часові параметри впливають на кількість відправленої інформації і швидкість доставки.

4. Загальна тенденція показує, що користувачі йдуть шляхом підвищення вимог до якості обслуговування. Натомість, ресурси телекомунікаційних систем є вичерпними і, очевидно, впливає проблема доступу до ресурсів, що породжує ряд задач для інженера телекомунікаційних систем.

5. Задача дослідження каналів телекомунікацій на каналному рівні в рамках теорії масового обслуговування полягає в тому, щоб обрати і використовувати адекватні моделі для опису і визначення кількісних характеристик систем передачі інформації з точки зору доступу до каналів телекомунікацій. Ототожнюючи характеристики телекомунікаційної системи та відповідну їй СМО, можна сформулювати рекомендації щодо раціональної побудови і організації роботи систем передачі інформації на каналному рівні при відомій сукупності ресурсів каналів телекомунікацій. Характеристики телекомунікаційної системи виражені в 14 формулах Літтла.

6. Виявлено, що структуру будь-якої СМО можна умовно поділити на рівні (рівень простою, рівні зайнятості  $n$ -го ОП, рівні очікування на обслуговування в  $m$ -му місці для черги та рівень пріоритетів), які безпосередньо впливають на показники QoS. Таким чином, було розглянуто наступні моделі СМО:

– Безпріоритетні СМО з одним та двома ОП;

- СМО з чергами
- СМО з абсолютним пріоритетом;
- СМО з відносним пріоритетом.

7. Розроблено методику побудови комплексної математичної мультипоточної моделі з двома ОП та пріоритетним обслуговуванням, завдяки чому спеціаліст телекомунікацій позбавиться потреби вирішувати громіздкі СЛАР, аби обчислити показники QoS.

Динаміка показників якості обслуговування розглянутих СМО показала, що безпріоритетні моделі не варто застосовувати при великих вхідних навантаженнях, оскільки вірогідність відмови в обслуговуванні заявок буде максимально високою. Проте, безпріоритетні моделі гарантують кращі показники QoS активнішим потокам.

Варто відзначити, що пріоритетне обслуговування є найвигіднішим інструментом покращення показників якості обслуговування у порівнянні зі збільшенням числа ОП або додаванням місць для черги, що не завжди фінансово вигідним для провайдера телекомунікаційних послуг.

У випадку, коли заявки вищого пріоритету – безкомпромісні, безсумнівно варто використовувати абсолютний пріоритет, який негайно перериває обслуговування заявки нижчого пріоритету. Суть такого переривання чітко простежується в аналітичних виразах обчислення ймовірностей станів-реципієнтів (стан потоку заявок вищого пріоритету), адже реципієнт отримує частку ймовірності стану-донора. При обслуговуванні з абсолютним пріоритетом отримана частка є максимальною.

Якщо заявки вищого пріоритету допускають компроміс, то варто використовувати обслуговування з відносним пріоритетом, оскільки в даному випадку переривання відбувається лише після закінчення обслуговування заявки нижчого пріоритету. Відтак, стан-донор віддає меншу частку власної ймовірності проміжному стану, який в свою чергу дає ще меншу частку стану-реципієнту.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Облачные вычисления. URL:  
[https://ru.wikipedia.org/wiki/Облачные\\_вычисления](https://ru.wikipedia.org/wiki/Облачные_вычисления)
2. Martynova K.G. Scopes to solve the task of telecommunication resources distribution to provide the required QoS. /XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій» ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції К.: НТУУ «КПІ». – 2020. – с.352-354
3. Stephen Watts, Muhammad Raza. SaaS vs PaaS vs IaaS: What's The Difference and How To Choose. /bmc blogs, 2019. URL:  
<https://www.bmc.com/blogs/saas-vs-paas-vs-iaas-whats-the-difference-and-how-to-choose/>
4. Uryvsky L.O., Martynova K.G. Complex analytical model of priority requires service on cloud server./IV International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019) – In the publishing process.
5. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания/ Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1966. – 431 с.
6. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. – М.: Машиностроение. –1979. –432 с., ил
7. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и её приложения. – СПб.: БХВ-Петербург. –2005. –288 с.: ил.
8. Левенберг Є.В. Оцінка характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка телекомунікаційних мереж. /Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук//– ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2019. – с. 20.
9. Росляков А.В., Ваняшин С.В., Самсонов М.Ю. и др. Сети следующего поколения NGN / Под ред. А.В. Рослякова. – М.:Эко-Трендз, 2008. – 424 с.



10. Baccelli F. Elements of Queueing Theory / F. Baccelli, P. Bremaud. – Springer, 2003. – 334 p.
11. Ложковский А.Г. Теория массового обслуживания в телекоммуникациях: учебник/ А.Г. Ложковский. –Одесса: ОНАСим. А. С. Попова, 2012. –112 с.: ил.
12. Уривський Л.О., Гахова Г.С. Сценарій реалізації ситуаційних пріоритетів обслуговування в системах доступу./ XI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ «КПІ». – 2017. – с. 69-71.
13. Уривський Л.О., Гахова Г.С. Узагальнення системи масового обслуговування з пріоритетами. / IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: Збірник матеріалів конференції К.: НТУУ «КПІ». – 2015. – с.77-79
14. Уривський Л.О., Мартинова К.Г. Комплексна аналітична модель обслуговування на хмарному сервері повідомлень із ознаками пріоритетів./ XII Міжнародна науково-технічна конференція студентів та аспірантів «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем» ПРІТС-2020: Збірник матеріалів конференції К.: НТУУ «КПІ». – 2020. – с.367
15. Урывский Л.А. Обобщение процесса «размножение и гибели» на системы с «конфликтом доступа. – Научно-виробничий збірник «Наукові записки УНДІЗ». – 2009 .– № 1(7). – с. 88-102.
16. Kleinrock L. Queueing Systems. Volume 1: Theory / Leonard Kleinrock. – Wiley-Interscience, 1975. – 417 p.
17. Kleinrock L. Queueing Systems, Vol. 2: Computer Applications / Leonard Kleinrock. – Wiley-Interscience , 1976. – 576 p.
18. Kleinrock L. Queueing Systems: Problems and Solutions / Leonard Kleinrock. –Wiley-Interscience, 1996. – 240 p.
19. Хинчин А.Я. Математические методы теории массового обслуживания. // Работы по математической теории массового обслуживания. Изд-во физ.-мат. Лит-ры. – М.: 1963. –с. 7-148.

20. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и её приложения. – СПб.: БХВ-Петербург. –2005. –288 с.: ил.
21. Ложковский А. Г. Теория массового обслуживания в телекоммуникациях / А. Г. Ложковский. – Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2012. – 112 с.
22. Fundamentals of Queueing Theory. D.Gross, J. Shortle, J. Thompson, J. Harris. – Wiley-Interscience, 2008. – 528 p.
23. Giambene G. Queueing Theory and Telecommunications: Networks and Applications/ Giovanni Giambene. –Springer, 2014. – 516 p.
24. Nelson R. Probability, Stochastic Processes, and Queueing Theory: The Mathematics of Computer Performance Modeling / Randolph Nelson. –Springer, 1995. – 583 p.
25. Thomas S. L. Elements of Queueing Theory / Saaty Thomas. –McGraw-Hill Inc.,US, 1961. – 440 p .
26. Office 365 Network Connectivity Principles  
<https://docs.microsoft.com/en-us/office365/enterprise/office-365-network-connectivity-principles>